

Palavras-chave: Alumínio, emissividade, tintas refletivas, luminosidade, consumos de energia

Resumo

O presente estudo foi desenvolvido em cooperação com o Departamento de I&D da CIN – Corporação Industrial do Norte, S.A e teve como objetivo central a formulação e caracterização de tintas de interior de elevada refletividade. Pelo uso destes revestimentos inovadores procura-se fazer face a uma problemática tão actual como é o consumo desmesurado de energia na climatização e iluminação de espaços interiores.

Ao longo do projecto foram estudados dois tipos de tinta reconhecidas por exibirem elevada refletividade em regiões distintas do espectro electromagnético.

A primeira abordagem assentou no facto de o alumínio ser, de entre os metais conhecidos, um dos que apresenta maior capacidade em refletir a radiação ao longo do infravermelho. A metodologia adoptada baseou-se na determinação das propriedades espectrais do filme de tinta, nomeadamente emissividade e TSR (Total Solar Reflectance) quando incorporadas diferentes percentagens em peso de pasta de alumínio. A aplicação de revestimentos de baixa emissividade permite uma redução nas trocas de calor por radiação que ocorrem entre superfícies adjacentes a diferentes temperaturas e, conseqüentemente um aumento da resistência térmica global das paredes exteriores à transferência de calor. Com este trabalho concluiu-se ser possível reduzir em 15% as perdas de calor para o exterior pelo uso destes novos revestimentos.

A segunda abordagem deste projecto baseou-se na reconhecida capacidade de as tintas de cor branca refletirem fortemente a luz visível e, por este motivo serem apontadas como tintas mais luminosas. Neste sentido procurou-se correlacionar a composição de nove tintas brancas com o valor de luminosidade lido num espectrofotómetro para três iluminantes diferentes (D65 – Luz solar; A – lâmpada incandescente de tungsténio; CWF – lâmpada branca fria fluorescente. Recorrendo-se ao Método do fluxo total concluiu-se ser possível reduzir em 41 % os consumos de energia em iluminação (poupança de 456 €/ano) pelo simples aumento de refletividade de 94,10% para 96,50 %.

Keywords: Aluminum, emissivity, reflective coatings, lighting, energy consumption

Keywords: The present work was developed in association with R&D department of CIN – *Corporação Industrial do Norte, S.A.* and had as final goal the formulation and characterization of interior highly reflective wall paints. By the use of these innovative coatings, we intend to reduce the consumption without limit of energy in air-conditioning and lighting of interior spaces. During this work we studied two types of coatings known to exhibit a high reflectivity in different regions of the electromagnetic spectrum.

The first approach was based on the fact that aluminum, from among all known metals, is one of which presents greater ability to reflect infrared radiation. The methodology used was based on determination the spectral properties of the paint film, particularly emissivity and total solar reflectance, when incorporated different percentages in weight of aluminum paste. The application of low emissivity coatings enables a reduction in radiative heat exchange between adjacent surfaces at different temperatures and consequently an increase in the overall thermal resistance to heat transfer. With this work it was concluded that it is possible to reduce by 15% the heat losses towards the outside, by the use of these new coatings.

The latter approach of this project was based on the known ability of white paints in strongly reflect visible light and for this reason be indicated as brighter paints. In this regard we attempted to correlate the composition of nine white paints with the respective brightness value read on a spectrophotometer to three different illuminants. (D65 – Solar light, A – Incandescent tungsten lamp, CWF – Cool white fluorescent lamp). By employing the Total flux method was found to be possible to reduce by 41% the energy consumption in lighting (savings of 456 Euros/year) by simply increasing reflectivity of 94, 10% to 96, 50%.

Índice

Introdução.....	1
1.1 Tintas de interior refletivas no Infravermelho	3
1.1.1 Radiação Térmica	3
1.1.2 Pigmentos de Alumínio	6
1.1.3 Estado da <i>Arte</i>	7
1.1.4 Consumos energéticos	9
1.1.5 Conforto Térmico	10
1.2 Tintas de interior refletivas no Visível.....	12
1.2.1 Relação luz do dia e refletividade das paredes	13
1.2.2 Tintas	14
1.2.3 Propriedades ópticas.....	15
A cor e sistemas de classificação.....	15
Opacidade	16
Dispersão da Luz.....	17
1.2.4 Fatores que influenciam a dispersão da luz	18
Tamanho médio de partícula	18
Grau de dispersão do pigmento.....	18
PVC e porosidade do filme	19
1.3.5 Princípios de iluminação	20
1.3.6 Consumos energéticos em Iluminação	21
Resultados e Discussão	25
2.1 Tintas refletivas no Infravermelho para redução de consumos de energia em climatização.....	25
2.1.1 Propriedades espectrais das tintas e vernizes	25
2.1.2 Reformulação do Verniz S/MR	27
2.1.3 Cor - Natureza dos pigmentos.....	29
2.1.4 Modo de Aplicação.....	30
2.1.5 Ensaio de estabilidade.....	31
2.1.6 Simulação à escala laboratorial.....	32
2.1.6.1 Objetivo	32
2.1.6.2 Montagem.....	32

2.1.6.3	Resultados e Discussão	33
2.1.7	Estimativa da redução de Consumos energéticos	36
2.2	Tintas refletivas no Visível para redução de consumos em iluminação	39
2.2.1	Composição e caracterização das Tintas Brancas	39
2.2.2	Influência da Natureza do ligante	41
2.2.3	PVC e porosidade das tintas	42
2.2.4	Luminosidade vs Cor	44
2.2.5	Pigmentos Fluorescentes	45
2.2.6	Estimativa do consumo de energia em iluminação	46
2.2.6.1	Cenário 1: Escritório	46
2.2.6.2	Poupança energética em iluminação do Cenário 1	47
2.2.6.3	Cenário 2: Habitação (T2)	48
2.2.6.4	Poupança energética em iluminação do Cenário 2	49
	Conclusões	53
	Descrição Experimental	57
3.1	Tintas refletivas no Infravermelho	57
3.1.1	Refletância UV/VIS/NIR	57
3.1.2	Refletância FTIR	58
3.1.3	Emissividade	58
3.2	Tintas Refletivas no Visível	59
3.3	Controlo de Qualidade	59
	Bibliografia	63

Índice de Figuras

Figura 1 - Distribuição dos consumos de energia por tipo de atividade.....	2
Figura 2 - Distribuição da Despesa em energia por tipo de utilização.....	2
Figura 3 - Emitância Espectral de corpos negros em função da temperatura.....	4
Figura 4 - Orientação dos Leafing-Pigment e Non Leafing-Pigment.....	6
Figura 5 – Contribuição da componente céu para o fator luz do dia em função da distância a uma janela. ⁹	14
Figura 6 - Sistema de cor CIELAB.....	16
Figura 7 – Variação da opacidade de um filme de tinta, de espessura constante, com a concentração em volume de pigmento (PVC). ²⁹	19
Figura 8 - Espectros de refletância no Infravermelho médio do Verniz S/MR + 20% pasta de alumínio e da Tinta Branca de referência. Verniz S/MR + 20% pasta de alumínio () e Tinta Branca de referência ()......	26
Figura 9 – Espectro de Reflectância na região do UV/VIS/NIR.	28
Figura 10 - Aplicação do Verniz C/OR + 20% pasta de alumínio em Carta de Leneta com uma espessura de filme húmido de 200 μ m e gama de cores obtidas quando adicionados os corantes transparentes.	30
Figura 11 - Curva de refletâncias no UV/VIS/ NIR da película de Verniz C/OR +20% de pasta de alumínio antes e após o ensaio de estabilidade.	32
Figura 12 – Modelo do cubo construído para simulação das temperaturas do ar interior e de superfície em laboratório.....	33
Figura 13 – Evolução das Temperaturas de superfície, do ar interior e do ar exterior ao longo do tempo.	35
Figura 14 - Velocidade de aquecimento das superfícies pintadas com <i>Verniz C/OR + 20% pasta de alumínio</i> e com <i>Tinta Branca de referência</i>	38
Figura 15 - Curvas de luminosidade da película de tinta em função da % de Pasta de pigmento orgânico amarelo (Pig.Y), verde (Pig. G); azul (Pig. B) e vermelho (Pig.R) adicionada à Tinta H	45
Figura 16- Influência da % Pigmento Y fluorescente na luminosidade da película de <i>Tinta H</i>	46
Figura 17 – Emissómetro AE1 <i>Devices and Services Company</i>	58
Figura 18 - Dispersor utilizado no fabrico das tintas.....	60
Figura 19 - Equipamento utilizado no controlo de pH das tintas fabricadas.....	60
Figura 20 - Viscosímetro de Stormer.....	61
Figura 21 - Viscosímetro ICI – Cone & Plate.....	62

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Valores de emissividade do revestimento de tinta antes e após a incorporação da pasta de alumínio (10 e 20 % (m/m)) numa tinta branca e verniz aquosos.	25
Tabela 2 - Valores de emissividade do verniz após adição do orientador reológico - <i>Verniz C/MR</i> .27	
Tabela 3 – <i>Total Solar Reflectance</i> (TSR) determinada através de medições realizadas na carta-branca (B) e na carta-preta (P).	29
Tabela 4 – Emissividade da película de <i>verniz C/OR</i> em função do modo de aplicação.	30
Tabela 5 – Temperaturas das superfícies registadas pelos termopares no início, estado estacionário e no fim do ensaio experimental.	33
Tabela 6 - Temperaturas do ar interior e do ar exterior registadas no início, estado estacionário e no fim do ensaio experimental.	34
Tabela 7 - Propriedades mássicas e térmicas das placas de gesso cartonado e Resistência térmica à condução de calor.	36
Tabela 8 - Parâmetros utilizados a determinação das resistências térmicas superficiais interior (Rs, i) e exterior (Rs, e). ¹⁶	36
Tabela 9 - Perdas de calor por m ² de parede de <i>Tinta Branca de referência</i> e de <i>Verniz C/MR + 20% P. alumínio</i> . Poupança energética.	37
Tabela 10 – Natureza do ligante; tipo de cargas e PVC das tintas brancas analisadas.	39
Tabela 11 - Valores de luminosidade obtidos para cada tipo de iluminante padrão.	40
Tabela 12 – Índices de refração das resinas utilizadas.	41
Tabela 13 – Influência da natureza da resina na luminosidade da Tinta A.	42
Tabela 14 – CPVC; razão PVC/CPVC e índice de porosidade do filme de tinta	43
Tabela 15 - Influência da substituição do Ext4 por talco na formulação da Tinta C.	44
Tabela 16 - Dimensões do recinto e valor do índice local.	47
Tabela 17 - Rácio entre as iluminâncias médias produzidas pelas tintas e fluxo luminoso instalado (Im).	48
Tabela 18 - Consumos energéticos em iluminação e poupança associada para cada tinta comparativamente à tinta de referência	48
Tabela 19 – Distribuição da área total pelas diferentes divisões da habitação. Factor de utilização e factor de manutenção.	49

Nomenclatura

σ	Constante de Stefan – Boltzmann	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
ε	Emissividade	
q	Fluxo de calor	$W \cdot m^{-2}$
T	Temperatura	K
T_{op}	Temperatura operativa	K
TMR	Temperatura Média Radiante	K
λ	Comprimento de onda	nm
α	Fração de radiação absorvida	
ρ	Fração de radiação reflectida	
τ	Fração de radiação transmitida	
h_{conv}	Coefficiente de transferência de calor por convecção	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
h_{rad}	Coefficiente de transferência de calor por radiação	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
h_{r0}	Coefficiente de radiação para a superfície de um corpo negro	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
T_m	Temperatura média termodinâmica da superfície e da sua vizinhança	K
R_{cond}	Resistência térmica da parede à condução de calor	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
R_{global}	Resistência térmica global da parede	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
R_s	Resistência térmica superficial	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
$\lambda_{térmica}$	Condutividade térmica	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
d	Espessura	m
L^*	Luminosidade da película de tinta	
S	Coefficiente de dispersão da luz	μm^{-1}
φ_i	Fluxo luminoso instalado	lm
φ_r	Fluxo luminoso recebido no plano de trabalho	lm
$\varphi_{lâmpada}$	Fluxo luminoso emitido pela lâmpada	lm

E_m	Iluminância média	<i>lux</i>
Y_m	Valor médio de luz refletida pelas superfícies interiores	
FM	Fator de manutenção	
FU	Fator de utilização	
k	Índice do local	
PVC	Concentração em volume de pigmento	
$CPVC$	Concentração crítica em volume de pigmento	
$P.I$	Índice de Porosidade	
ACH	Air Changes per hour	
ASTM	American Society for Testing Materials	
ASHRAE	American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers	
RIMA	Reflective Insulation Manufacturers Association	
CIE	Commission International de l'Eclairage	
IRCC	Interior Radiation Control Coating	
TSR	Total Solar Reflectance	
Verniz C/MR	Verniz refletivo com modificador reológico	
Verniz S/MR	Verniz refletivo sem modificador reológico	
$T_{s_refletiva}$	Temperatura da superfície revestida Com verniz de Alumínio	<i>K</i>
T_{s_Branca}	Temperatura da superfície revestida com tinta branca	<i>K</i>
$T_{parede_refletiva}$	Temperatura da parede (entre o gesso e o cartão) revestida com verniz de alumínio	<i>K</i>
T_{parede_Branca}	Temperatura da parede (entre o gesso e o cartão) revestida com tinta branca	<i>K</i>
$T_{s_méd(S:S)}$	Média entre a temperatura de superfície e a temperatura da parede no estado estacionário	<i>K</i>

Introdução

Ao longo dos últimos anos, suportados por uma crescente consciência económica e ambiental, tópicos como isolamento térmico, redução dos custos em energia e minimização das emissões de dióxido de carbono ganharam a importância merecida.

Os hábitos de consumo no sector dos edifícios têm vindo a sofrer alterações profundas nos diferentes países da Comunidade Europeia representando atualmente 40% do consumo global de energia.¹ Este panorama levou à necessidade de implementação de diretivas Europeias como é o caso da Diretiva 2010/31/EU do Parlamento e Conselho Europeu, de 19 de Maio de 2010 que preconiza a *“melhoria do desempenho energético dos edifícios”* e tem como objectivo final a contenção dos consumos neste sector. De acordo com a diretiva, *“A gestão da procura de energia é um instrumento importante, que permite à União influenciar o mercado global da energia e, por conseguinte, a segurança do abastecimento energético a médio e longo prazo”*.¹

Quando analisado o caso de Portugal, de acordo com o *“Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico (2010)”* (Figura 1) o aquecimento do ambiente é indicado como o terceiro tipo de utilização que mais contribuiu para o consumo de energia (21,5%). No entanto quando olhamos para a despesa em energia (Figura 2) este surge como o menos dispendioso face ao consumo associado (apenas 10,7% da despesa total), em grande parte devido à utilização de lenha para esse efeito. A iluminação por sua vez, representa apenas 4,5% do consumo total de energia e tem um peso de 6,1% na despesa global. O mesmo se deve ao facto de neste caso se utilizar eletricidade que é indicada como a principal fonte de energia consumida no sector doméstico (cerca de 42,6 % do consumo total de energia).²

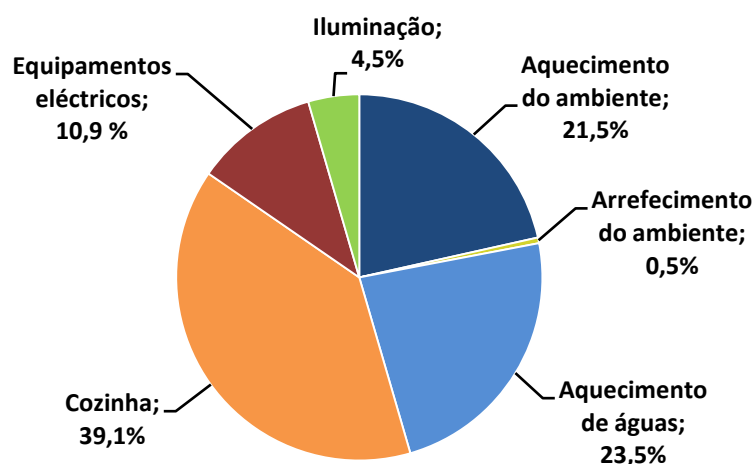


Figura 1 - Distribuição dos consumos de energia por tipo de atividade

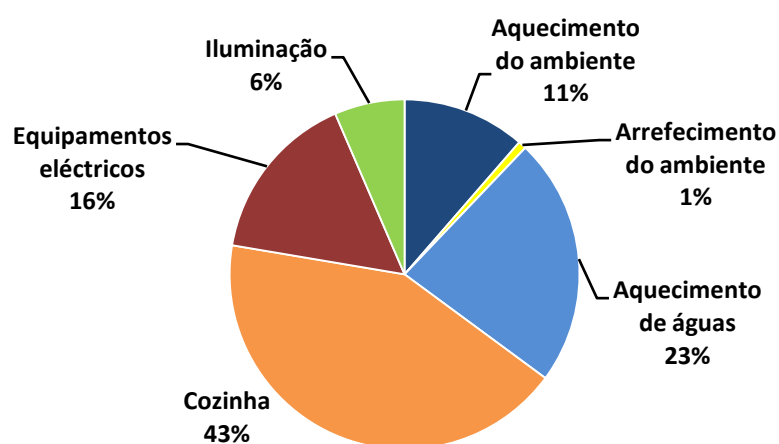


Figura 2 - Distribuição da Despesa em energia por tipo de utilização.

Adaptado de: INE/DGEG – Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico, Portugal 2010.

Aos consumos referidos anteriormente estão associados valores elevados de emissões de gases de efeito de estufa que determinam um elevado peso no quadro de cumprimento nacional das obrigações decorrentes do Protocolo de Quioto.³ Face a este cenário é de extrema

importância que se tomem medidas no sentido de melhorar a performance energética das habitações e simultaneamente manter um ambiente interior confortável aos seus ocupantes.

É neste contexto que surge o trabalho apresentado e que tem por objetivo a contenção de custos de energia em climatização e iluminação, pelo desenvolvimento de tintas de elevada refletividade no infravermelho médio-longo e no visível respectivamente. Uma das soluções em voga nos últimos estudos desenvolvidos no âmbito da climatização das edificações é o desenvolvimento e a aplicação de revestimentos refletivos - “cool roofs”, “radiation barriers”, “Interior radiation Control Coatings”.⁴

1.1 Tintas de interior refletivas no Infravermelho

1.1.1 Radiação Térmica

Radiação térmica é a denominação dada à emissão de energia pela matéria devido à sua temperatura. Max Planck estabeleceu que qualquer corpo a uma temperatura acima do zero absoluto ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) é capaz de emitir radiação térmica na forma de ondas electromagnéticas. Em 1900, propôs uma equação que permite descrever a distribuição espectral de um corpo negro em função da sua temperatura. Curvas espetrais de corpos negros a diferentes temperaturas encontram-se representadas na Figura 3.⁵ Um corpo negro é um corpo físico ideal que absorve toda a radiação electromagnética incidente, independentemente da frequência e ângulo de incidência.⁶

A curva a amarelo (Figura 3) representa a emitância espectral do sol, a uma temperatura de superfície de aproximadamente 5800 K. O máximo de radiação é atingido por volta dos $0,4\text{-}0,6\text{ }\mu\text{m}$, comprimentos de onda correspondentes à região visível do espectro electromagnético. Por sua vez, corpos à temperatura ambiente (300 K) – curva a vermelho - apresentam o seu máximo de emissão de radiação na região do infravermelho médio-longo para comprimentos de onda compreendidos entre $5\text{-}50\text{ }\mu\text{m}$.^{5,6}

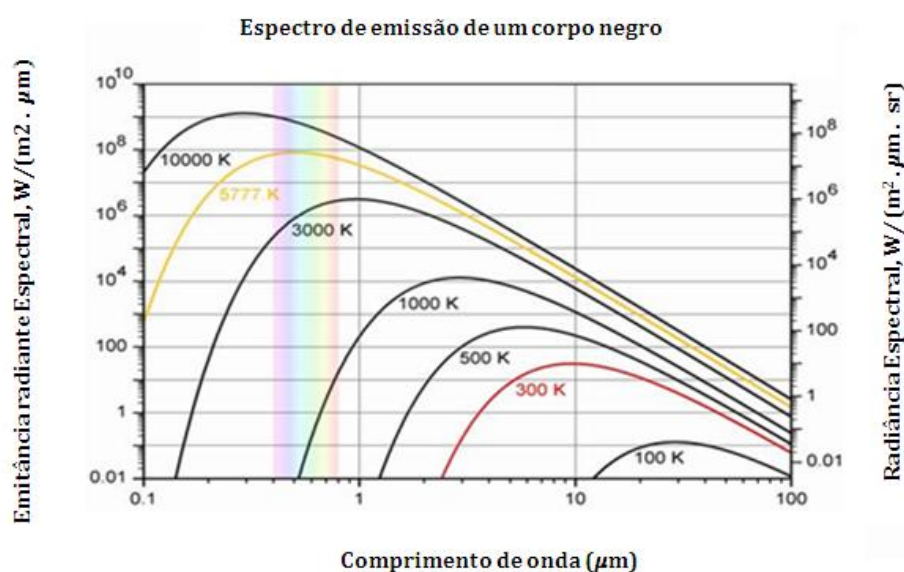


Figura 3 - Emitância Espectral de corpos negros em função da temperatura.

Adaptado de <http://www.ips-innovations.com>

O poder emissivo total de um corpo negro resulta da integração da Equação de Planck da Emitância espectral e corresponde à área sob as curvas espectrais (Figura 3) que é descrita pela lei de *Stefan- Boltzmann eq(1)*. A lei de *Stefan- Boltzmann* estabelece que o fluxo de calor emitido por um corpo negro é diretamente proporcional à quarta potência da sua temperatura absoluta.

$$q = \sigma \cdot T^4 \quad eq(1)$$

A *eq (1)* realça a elevada dependência da emissão de radiação com a temperatura. Comparativamente ao mecanismo de convecção e condução que apenas dependem da diferença de temperaturas entre dois pontos, o mecanismo de transferência de calor por radiação depende da diferença absoluta de temperaturas entre dois corpos cada uma elevada à quarta potência. A partir das diferenças verificadas entre estes três mecanismos de transferência de calor é evidente que o mecanismo de radiação ganha importância e aumenta a sua contribuição para níveis de temperatura absoluta elevados.⁶

Para além de emitirem radiação como resultado da sua temperatura absoluta, os corpos exibem comportamentos diferentes em relação à radiação incidente proveniente de fontes externas. Quando um feixe de radiação externa incide na superfície de um corpo, esta pode ser

parcialmente absorvida, parcialmente reflectida e/ou parcialmente transmitida. Assim de acordo com a lei de conservação de energia vem,

$$\rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} + \alpha_{\lambda} = 1 \quad eq (2)$$

Para materiais opacos, a porção de radiação incidente que é transmitida aproxima-se de zero podendo ser desprezada. ($\tau_{\lambda} = 0$).

Propriedades como absortividade, refletividade e emissividade são utilizadas para descrever o comportamento radiativo de corpos reais comparativamente ao comportamento apresentado por corpos negros à mesma temperatura. Algumas relações e igualdades, como é o caso da Lei de Kirchhoff, foram estabelecidas por forma a facilitar o cálculo de algumas destas propriedades. A lei de *Kirchhoff* assume que uma superfície que apresente dificuldade em absorver energia numa determinada frequência terá também a mesma dificuldade em emití-la. Dependendo se as quantidades de energia envolvidas são consideradas espectrais ou totais, direcionais ou hemisféricas, diferentes restrições são impostas à lei de Kirchhoff.⁶

Assumindo absortividade e emissividade hemisféricas totais verifica-se que é válida a lei de Kirchhoff se:

- A radiação incidente for independente do ângulo e apresentar distribuição espectral proporcional a um corpo negro à mesma temperatura de superfície T_s ou,
- A radiação incidente for independente do ângulo e α_{λ} e ε_{λ} independentes do comprimento de onda (superfície cinzenta direcional) ou,
- A radiação incidente apresentar distribuição espectral proporcional a um corpo negro à mesma temperatura de superfície T_s e α_{λ} e ε_{λ} independentes do ângulo e comprimento de onda (superfície cinzenta difusa).

Assim, no equilíbrio e a uma dada temperatura a fração de energia absorvida - absortividade (α) iguala a fração de energia emitida - emissividade (ε) de acordo com a eq (3).

$$\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda} \quad eq (3)$$

A emissividade é uma medida da habilidade com superfícies reais irradiam energia e é dada pelo rácio entre a emitância real do corpo e a emitância de um corpo negro à mesma temperatura.⁶

A energia emitida por um corpo real em conjunto com a fração de radiação incidente que é refletida pela superfície, pode abandonar o corpo de forma *especular* ou *difusa*. No primeiro caso, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão e ocorre geralmente em superfícies polidas. A reflexão diz-se difusa, quando os raios que abandonam a superfície não apresentam uma direção preferencial, isto é distribuem-se uniformemente em todas as direções.

1.1.2 Pigmentos de Alumínio

Os pigmentos metálicos, particularmente os flocos de alumínio, refletem fortemente ao longo da região do infravermelho médio – longo e são o principal ingrediente dos revestimentos de baixa emissividade.⁷

As propriedades espectrais oferecidas por estes pigmentos devem-se, em grande parte, à geometria lamelar e perímetro irregular das suas partículas bem como à sua dimensão (0.5 a 200 μm).¹³ De entre os metais conhecidos, o alumínio polido é um dos metais que apresenta menor emissividade, sendo que o seu valor ronda os 4%. No entanto, a eficiência deste material como refletor tende a diminuir ao longo do tempo devido à oxidação do metal na superfície ou ainda à acumulação de sujidade.

Os pigmentos à base de alumínio dividem-se em dois grandes grupos: *leafing pigments* e *non-leafing pigments*. Os pigmentos designados de *leafing pigments* têm a tendência de emergir até à superfície e, por ação do lubrificante utilizado na sua produção (ácidos gordos saturados) orientar-se paralelamente ao filme de tinta. Permitem obter acabamentos metálicos com excelente poder de cobertura. Os pigmentos *non-leafing* por sua vez, são produzidos utilizando ácidos gordos insaturados, como é o caso do

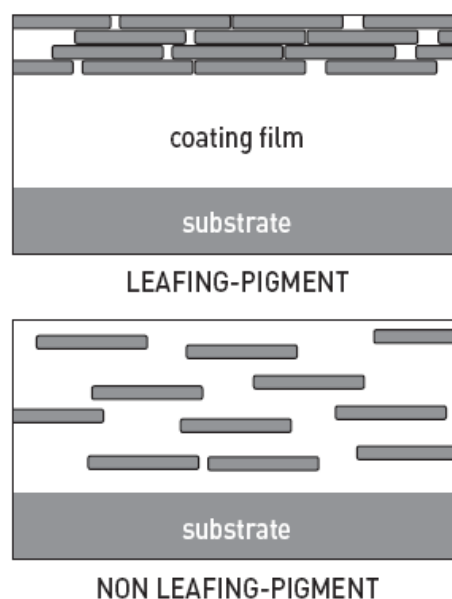


Figura 4 - Orientação dos Leafing-Pigment e Non Leafing-Pigment

ácido oleico e, quando incorporados numa tinta distribuem-se uniformemente ao longo de todo o filme (Figura 4). Comparativamente aos *non-leafing*, os *leafing pigments* apresentam valores de reflexão mais elevados, no entanto, oferecem pior resistência química e mecânica. Para além do referido anteriormente, os *non-leafing pigments* são compatíveis com pigmentos orgânicos coloridos permitindo uma aparência policromática.^{8,9}

Os pigmentos de alumínio utilizados na formulação da tinta em estudo fazem parte do grupo dos *non-leafing pigments* e encontram-se encapsulados com uma camada homogênea e transparente de sílica. O processo de encapsulamento garante uma maior estabilidade mecânica e química dos pigmentos em sistemas aquosos e em emulsão.

1.1.3 Estado da Arte

Os materiais de construção apresentam, na sua generalidade valores de emissividade que rondam os 0,9, isto é, emitem 90% do calor que é armazenado nos edifícios durante o período de inverno e, absorvem 90% do calor quando expostos a radiação no período de verão.⁵ De modo a compensar os elevados ganhos e perdas de calor verificados e manter uma temperatura do ar interior confortável, os ocupantes recorrem a sistemas de climatização. Consequentemente agravam os seus encargos financeiros mensais em energia. Uma das soluções apresentadas pela RIMA passa pelo uso de "*Interior radiation control coatings*". A ASTM define um IRCC como um revestimento de emissividade independente da espessura que, uma vez aplicados a materiais de construção não porosos baixam o seu valor de emissividade de 0,9 para valores iguais ou inferiores a 0,25.^{4,10} Pelo uso destes novos materiais o fluxo de calor por radiação entre superfícies interiores a diferentes temperaturas pode ser largamente reduzido e, consequentemente as perdas de calor no inverno e ganhos de calor no verão serem minimizados. No entanto, este efeito tende a ser mais pronunciado no caso de aquecimento/arrefecimento radiativo, isto é, para coeficientes de transferência de calor por convecção baixos.¹¹

Até ao momento são poucos os estudos dedicados à avaliação do desempenho de tintas de baixa emissividade no interior de edificações. É de salientar o trabalho desenvolvido por *Daoud et al.*, no qual os requisitos energéticos para refrigeração de ringues de gelo foram simulados para tectos com superfícies de emissividade variável.¹² Os resultados demonstraram que o fluxo de calor por radiação é dominante por um fator de 10 quando comparado com o fluxo de calor por

condução e condensação, para superfícies de emissividade elevada. Para superfícies de baixa emissividade, o fluxo de calor total sofre uma redução significativa.

Um estudo realizado pela *Bauhaus University Weimar* foi levado a cabo com o intuito de examinar o efeito da diminuição da emissividade de uma tinta de interior à base de alumínio no consumo de energia e conforto térmico.¹³ As medições tiveram lugar numa sala climática equipada com um modelo artificial térmico coberto por sensores que permite simular a pele humana e medir o seu conforto térmico. Os resultados demonstraram que uma diminuição na emissividade do revestimento conduz a uma diminuição da temperatura de superfície das paredes exteriores. Consequentemente as perdas de calor por condução ao longo da parede diminuem, o que se traduziu numa poupança de cerca de 15% nos consumos em energia. Por outro lado, a redução das trocas de calor por radiação entre o corpo humano (modelo artificial) e as superfícies adjacentes permite que se diminua a temperatura do ar interior, sem que ocorra penalização do nível de conforto. Neste caso a poupança em energia atingiu os 22%.

Recentemente foi realizado um estudo¹⁴ onde se simula o comportamento térmico de pequenas cabines revestidas interiormente e exteriormente por tintas refletivas. Aqui simularam-se diferentes condições de ganhos de calor interno ($0 - 500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$); taxa de ventilação ($0 - 1,5$ ACH) e condições climáticas (clima quente e frio). Concluiu-se que as tintas refletivas de interior contribuem para a poupança de energia em aquecimento, mas que para ganhos internos elevados (a partir dos $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) penaliza fortemente o consumo de energia em arrefecimento. As tintas refletivas exteriores por sua vez, contribuem para a poupança de energia em arrefecimento mas penalizam os consumos de energia em aquecimento, sendo por isso mais adequadas a climas quentes.

Relativamente a taxa de ventilação, o uso de tintas de interior refletivas conduz a uma redução no consumo total de energia, quando assumido o maior valor de renovações de ar/ hora. Isto porque, no inverno, à medida que a taxa de ventilação aumenta é necessário um nível de aquecimento superior para compensar as perdas de calor verificadas. Consequentemente aumenta a quantidade de radiação disponível nas cabines que é novamente refletida para o interior das mesmas, aumentando o conforto. No verão, a quantidade de energia necessária para arrefecimento apresentou pouca dependência com a eficiência da transferência de calor por radiação entre superfícies.

1.1.4 Consumos energéticos

A utilização de tintas de interior de baixa emissividade em substituição às tintas de interior convencionais atua de duas formas distintas na redução dos consumos de energia em climatização. Por um lado aumenta a resistência térmica global da parede à transferência de calor através da diminuição do coeficiente de transferência de calor por radiação e por outro aumenta o conforto térmico dos ocupantes por alteração da temperatura média radiante (TMR).⁵

As paredes representam uma fração predominante dos edifícios e têm como principal função garantir o conforto térmico e acústico sem comprometer a estética dos mesmos. Uma das principais propriedades a ter em conta na avaliação de consumos energéticos dos edifícios é a resistência térmica das paredes, sendo que a sua contribuição aumenta largamente para edifícios altos, onde o rácio entre a área de paredes e área total do edifício é elevado.¹⁵

A resistência térmica global à transferência de calor de uma parede exterior é dada por,

$$R_{global} = \underbrace{\frac{1}{h_{rad,i} + h_{conv,i}}}_{R_{s,i}} + R_{cond} + \underbrace{\frac{1}{h_{rad,e} + h_{conv,e}}}_{R_{s,e}} \quad eq(4)$$

Os parâmetros da *eq (4)*, nomeadamente a resistências térmicas superficiais interior, $R_{s,i}$ e exterior, $R_{s,e}$, podem ser determinados recorrendo a simplificações disponíveis na norma EN ISO 6946:2007 e que têm em consideração um efeito combinado de mecanismos de convecção e radiação.¹⁶

O coeficiente de convecção, h_{conv} , é definido de acordo com a posição da superfície em relação à direção do fluxo de calor, com a geometria da superfície e ainda a velocidade do ar. O coeficiente de radiação, h_{rad} , por sua vez depende da emissividade da superfície e da sua temperatura média.

1.1.5 Conforto Térmico

A norma ISO 7730 define conforto térmico como uma *“condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico e que requer uma avaliação subjectiva”*.¹⁷

O corpo humano produz e liberta continuamente calor para o ambiente à sua volta como resultado de processos metabólicos. Quando as superfícies adjacentes absorvem esse calor e, apenas refletem pequenas quantidades o corpo humano perde muita energia. Como consequência o ocupante sente-se desconfortável e recorre a sistemas de aquecimento/arrefecimento para aumentar/diminuir a temperatura do ar interior e consequentemente aumentar o seu conforto.^{5, 18}

Na avaliação do conforto térmico existem seis factores primários que devem ser tidos em consideração:

- Metabolismo
- Vestuário
- Temperatura do ar
- Temperatura média radiante
- Velocidade do ar
- Humidade

A norma ASHRAE 55-2004 especifica condições para as quais uma fração bem definida de ocupantes considera o ambiente termicamente aceitável.¹⁹ Conhecidos os limites desta região de conforto é possível determinar o número de graus -hora de desconforto. Um grau - hora corresponde ao desconforto provocado pela temperatura do ar interior quando esta é menor que o limite inferior do intervalo ou ultrapassa o limite superior em 1°C, durante 1 hora.¹⁸

Como já foi referido anteriormente, a emissividade das superfícies atua diretamente na temperatura média radiante. Este parâmetro, bastante utilizado na quantificação de conforto, representa a temperatura que um indivíduo sente devido à temperatura radiante das várias superfícies a que está exposto.²⁰ No ser cálculo deve ser considerado uma média das temperaturas das superfícies na vizinhança do ocupante pesadas por um factor de forma entre o ocupante e a superfície considerada.

Os limites da região de conforto definida pela ASHRAE são geralmente definidos em termos de temperaturas operativas, T_{op} . Parâmetro de conforto que avalia se uma pessoa sente muito frio ou muito calor num espaço interior.

$$T_{op} = \frac{h_{conv} \cdot T_{ar} + h_{rad} \cdot TMR}{h_{conv} + h_{rad}} \quad eq(5)$$

De acordo com a *eq(5)*, no inverno uma temperatura média radiante superior quando utilizados revestimentos de baixa emissividade permite que a temperatura do ar interior seja diminuída sem que ocorra penalização do nível de conforto dos ocupantes, facto que se traduz numa poupança de energia adicional.

Alguns estudos realizados até momento mostraram que numa habitação em que as paredes se encontram revestidas com uma tinta de baixa emissividade, a temperatura operativa altera significativamente com a posição do ocupante no espaço e com a dimensão do espaço.

1.2 Tintas de interior refletivas no Visível

Um dos sectores com maior expressão no consumo global de energia elétrica em iluminação é o sector dos escritórios. Alguns estudos realizados neste sector^{23, 24} concluíram que permitir aos trabalhadores desempenhar as suas tarefas sob níveis de iluminação desejados, não só aumenta a sua satisfação como se traduz numa maior poupança energética. Tensão ocular, fadiga, irritabilidade e dores de cabeça são alguns dos sintomas apresentados decorrentes de uma fraca iluminação e que têm consequência direta na sua produtividade.²⁵

No que diz respeito ao sector da indústria, alguns engenheiros²⁴ reconheceram ainda que a aplicação de sistemas de iluminação inadequados e insuficientes nos postos de trabalho foi responsável por alguns dos acidentes de trabalho verificados até então neste sector. Tais comportamentos foram sustentados por *Lozano* (1978) quando afirmou que *“a luz é uma necessidade básica do ser humano e que tem a capacidade de afectar o seu comportamento físico, fisiológico e psicológico”*.²⁵

Um estudo realizado²⁶ indicou o investimento em sistemas de iluminação eficientes como uma das opções mais económicas quando se pretende reduzir as emissões de dióxido de carbono. Acrescidamente afirmaram ainda ser possível diminuir em 50% o consumo de energia em iluminação pela simples aplicação de tecnologia atualmente disponível.

Recentemente, *Dubois* (2011) apresentou um conjunto de potenciais estratégias para a poupança de energia elétrica em escritórios. É de salientar o efeito da refletividade das superfícies interiores. Neste sentido apontou a utilização de cores mais luminosas nas superfícies interiores como forma de maximizar a reflexão de luz natural no espaço e até mesmo a reflexão de luz elétrica nas paredes.²⁶

Alguns anos antes, *Loe* (2003) já havia se questionado da razão que levava os ocupantes a permanecerem insatisfeitos afirmando que o espaço lhes parecia sombrio, mesmo quando a correta iluminação sob a área de trabalho era assegurada. Concluiu que, na maioria das vezes o mesmo se devia ao facto das paredes apresentarem baixa refletividade.²⁶

Um estudo realizado pela University of Oregon, USA²⁷ procurou relacionar a luz do dia com a refletividade de diferentes cores. Para tal, procedeu à realização de três experimentos nos quais trinta participantes foram avaliados quanto à percepção da cor. Concluíram que o olho humano é capaz de fazer julgamentos separados acerca da refletividade da cor e que por isso os espaços podem parecer bastante coloridos sem por isso parecem pouco luminosos.

1.2.1 Relação luz do dia e refletividade das paredes

Num determinado espaço, provido de pelo menos uma janela, a quantidade e distribuição de luz do dia é função do tamanho e localização da janela, da geometria do quarto e ainda da refletividade das superfícies.²⁷

Um dos principais parâmetros a ter em conta num projecto de iluminação é o *factor luz do dia*. Este é definido como a razão entre a iluminância num determinado ponto do espaço interior e a iluminância proveniente do exterior, para um céu encoberto padrão.¹⁸

No gráfico da Figura 5 está representado, a tracejado, a variação da *componente céu* e, a cheio a variação do *factor luz do dia* em função da distância a uma janela. De acordo com o gráfico apresentado, à medida que a distância à janela aumenta, a componente céu contribui cada vez menos para o factor luz dia. A partir de determinado ponto, a parede oposta à janela aumenta a sua contribuição no *factor luz do dia* em proporção à sua refletividade.

Uma elevada refletividade das superfícies contribui de duas formas para uma melhor performance de espaços interiores. Por um lado, distribuem melhor a luz, sendo aparentemente mais brancos, luminosos e por isso mais eficientes. Por outro lado, o contraste entre a luz que entra através das janelas e a que é refletida nas paredes é menor traduzindo-se num maior conforto visual.

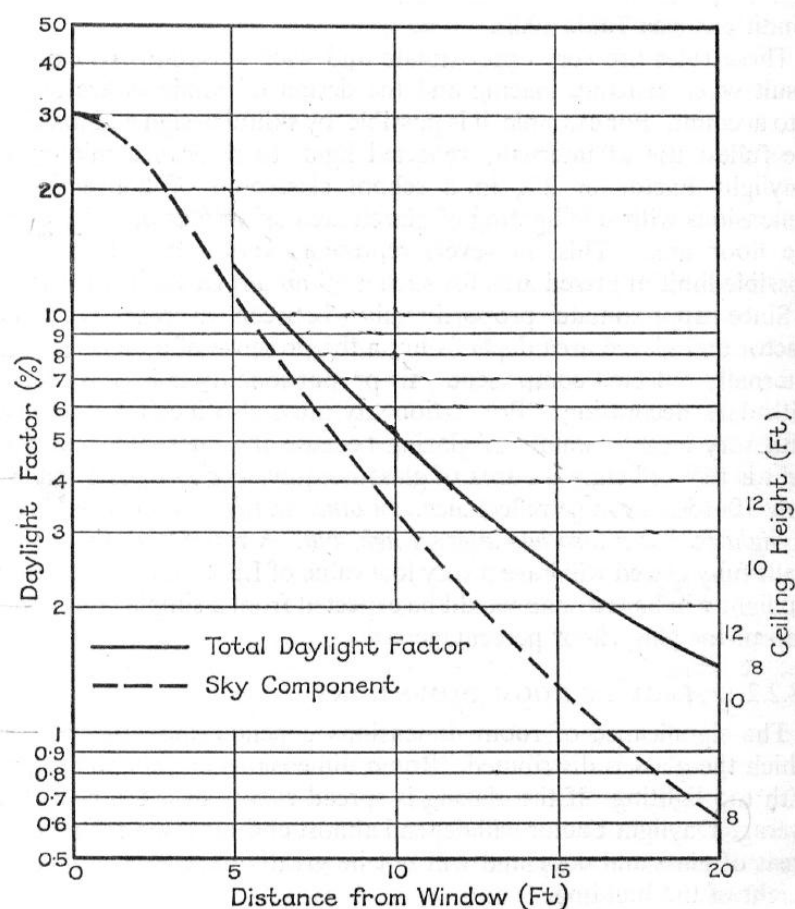


Figura 5 – Contribuição da componente céu para o fator luz do dia em função da distância a uma janela.⁹

1.2.2 Tintas

Em termos fundamentais uma tinta é considerada uma dispersão de partículas sólidas (pigmento) suspensas num meio orgânico (resina). O grau de dispersão depende da distribuição e tamanho médio das partículas de pigmento e tem influência direta nas propriedades ópticas e reológicas da tinta.^{11,30}

Os pigmentos são descritos como substâncias sólidas, finamente divididas e praticamente insolúveis no veículo, utilizados na preparação de tintas com a finalidade de lhes conferir cor através da absorção e reflexão de luz, opacidade entre outras características especiais.¹³ O pigmento com maior destaque na formulação de tintas brancas é o dióxido de titânio, uma vez

que apresenta elevada eficiência em dispersar a luz visível conferindo brancura, luminosidade e opacidade ao revestimento de tinta.

Dependendo do processo de produção os pigmentos de dióxido de titânio podem existir em duas fases cristalinas, *anatase* e *rutile*. Os pigmentos de *rutile* são preferencialmente escolhidos devido ao facto de apresentarem uma maior estabilidade, durabilidade e ainda um elevado índice de refacção (2,70) comparativamente aos pigmentos de *anatase* que apresentam índices de refacção de 2,55.

1.2.3 Propriedades ópticas

A cor e sistemas de classificação

A *Commission International de l'Eclairage (CIE)* é uma organização internacional que dita as normas que devem ser seguidas para determinar numericamente as medidas de uma cor. De acordo com o sistema CIE, existem três condições que definem a existência de cor, o iluminante, o objecto e o observador. O modelo de cor CIELAB foi criado em 1976, pela CIE para aumentar a uniformidade das cores percebidas pelo sistema visual humano.

A cor pode ser definida em termos de três atributos:

- CIELAB lightness value (L^*) - representa a quantidade de luz visível que é refletida por uma superfície colorida relativamente à quantidade de luz que é refletida por um branco perfeito. É uma medida da percepção de luminosidade que uma cor apresenta.
- CIELAB chroma value (C^*) - é uma medida da intensidade ou saturação de uma cor. Se toma o valor zero, diz-se que é acromática.
- CIELAB hue value h - atributo de uma sensação visual de acordo com a qual uma área parece ser semelhante a outra de cor conhecida. O ângulo h define a posição de uma cor, no espaço de cores CIE L^*a^*b em relação às cores primárias vermelho, amarelo, verde e azul.

Quantitativamente, a opacidade pode ser medida em termos de razão de contraste, poder de cobertura e coeficiente de dispersão. A razão de contraste é dada pela razão entre as refletâncias do filme de tinta que cobre o fundo preto e o fundo branco de uma carta de Leneta. O poder de cobertura, em unidades de $m^2.L^{-1}$ corresponde à área coberta por uma unidade de volume de tinta com espessura suficiente para produzir uma razão de contraste 98%. E por fim o coeficiente de dispersão (S), expresso em unidades de μm^{-1} é uma medida da habilidade do filme de tinta em dispersar a luz e é função das propriedades da interface pigmento/meio.

Dispersão da Luz

O controlo primário da opacidade e brancura de um filme de tinta depende da sua capacidade em dispersar a luz. Em revestimentos de tinta, a luz é dispersa por reflexões que ocorrem na superfície do pigmento, refrações e difracções.²⁹

As resinas utilizadas na formulação de tintas formam na sua grande maioria um filme transparente que nem absorve ou reflete luz de um modo significativo. Os pigmentos brancos por sua vez, contribuem largamente para as propriedades ópticas das tintas. Quando a luz atinge a superfície de um pigmento, parte dessa luz é refletida enquanto outra atravessa a partícula e é refractada. A fração de luz refractada pode ser novamente refletida no interior do pigmento ou então ser refractada e abandonar a partícula. As múltiplas reflexões e refrações de luz que ocorrem na superfície e interior das partículas de pigmento conduzem ao efeito de dispersão da luz em todas as direções.⁸

O fenómeno de dispersão da luz depende do ângulo de incidência da luz e é favorecido com o aumento da diferença entre o índice de refração do pigmento e o do meio que envolve as partículas, de acordo com a lei de *Fresnel* da refletividade.

1.2.4 Fatores que influenciam a dispersão da luz

Tamanho médio de partícula

A gama de comprimentos de onda do espectro de luz visível está compreendida entre os 0,4 – 0,7 μm e apresenta um pico de reflexão por volta dos 0,55 μm .

Quando o tamanho médio das partículas de pigmento se aproxima de metade do comprimento de onda da luz incidente (0,2 – 0,3 μm) as partículas conseguem dispersar entre quatro a cinco vezes mais a luz.²⁹ Com a diminuição do tamanho médio de partícula, aumenta o número de partículas e, consequentemente o número de superfícies disponíveis para que ocorra reflexão e refração da luz incidente. No entanto, se o tamanho de partícula for suficientemente pequeno, quando comparado com o comprimento de onda da luz incidente, a frente de onda pode passar à volta da partícula em vez de a atravessar. Neste caso não ocorre a reflexão da luz e a dispersão diz-se transparente.

Grau de dispersão do pigmento

O processo para se atingir uma dispersão dita satisfatória passa por molhar os pigmentos no meio de dispersão (resina) de modo a que o ar ou outros contaminantes sejam retirados da sua superfície, separar os grandes aglomerados de partículas e estabilizar as partículas de diâmetro óptimo que se formam. Num sistema real a energia envolvida na agitação durante a incorporação do pigmento no meio não é suficiente para superar as forças de atracção de *van der waals* entre partículas de pigmento, ocorrendo o fenómeno designado de floculação. A floculação constitui um dos principais factores responsável pela diminuição da capacidade dos pigmentos dispersarem a luz, visto estar intimamente relacionado com o tamanho médio de partícula. Como tal, durante o fabrico o grau de dispersão é controlado pela adição de agentes dispersantes que previnem ou pelo menos reduzem a aglomeração e floculação de partículas de pigmento.^{28,29}

PVC e porosidade do filme

Um dos parâmetros mais importantes na caracterização de uma tinta é a concentração em volume de pigmento (PVC). Matematicamente corresponde ao rácio entre o volume de pigmentos/cargas e o volume total de componentes não voláteis.

A distribuição das partículas de pigmento ao longo do filme de tinta está diretamente relacionada com o PVC. À medida que se aumenta o PVC é esperado que as constantes de absorção e dispersão definidas no modelo de *Kubelka_Munk* também aumentem devido ao facto de um maior número de partículas se encontrarem disponíveis para a ocorrência destes fenómenos.

Como é possível observar no gráfico da Figura 7, para valores de PVC baixos a curva aumenta quase linearmente, corroborando a hipótese anterior. No entanto, atingido o seu valor máximo, a constante de dispersão da luz começa a diminuir devido ao efeito de empacotamento das partículas e atinge um valor mínimo designado de CPVC – concentração em volume de pigmento crítica.^{8,28,29} O CPVC corresponde à concentração volúmica de pigmento para a qual existe ligante suficiente para preencher os interstícios entre as partículas de pigmento e formar um filme de tinta contínuo. Valores aproximados de CPVC podem ser determinados conhecendo os valores de absorção em óleo dos pigmentos.

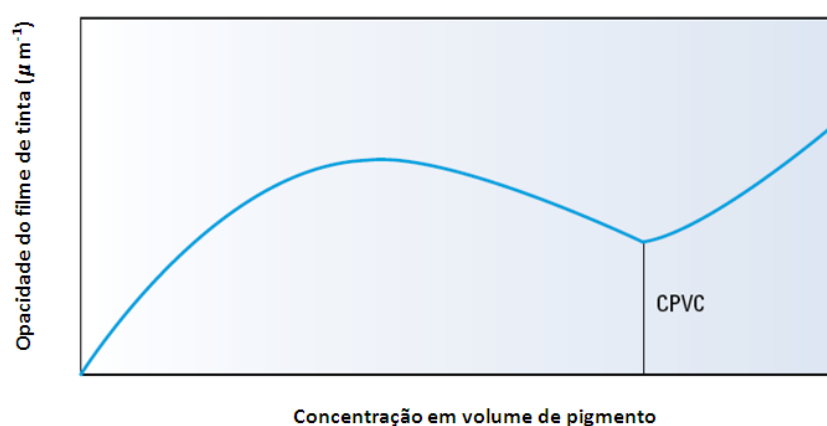


Figura 7 – Variação da opacidade de um filme de tinta, de espessura constante, com a concentração em volume de pigmento (PVC).²⁹

Acima do valor de CPVC ocorre a formação de poros de ar no filme de tinta e a resina apenas estabelece pontes de ligação entre as partículas de pigmento e as restantes cargas. Este aumento de porosidade do filme de tinta seca conduz a um aumento da eficiência de dispersão da luz pela diminuição efetiva do índice de refração do meio que, neste caso passa a ser o ar que se encontra aprisionado dos poros.

*Stieg and Ensminger*⁸ demonstraram que para tintas acima de CPVC o poder de cobertura e o índice de porosidade correlacionam-se linearmente. O índice de porosidade P.I pode ser determinado pela eq(6).

$$P.I = 1 - \frac{CPVC (1 - PVC)}{PVC (1 - CPVC)} \quad eq (6)$$

1.3.5 Princípios de iluminação

Os sistemas de iluminação têm como objetivo fundamental proporcionar um ambiente visual visível, adequado e confortável, permitindo aos ocupantes desempenhar determinadas tarefas. Para esse efeito é utilizada luz que corresponde ao conjunto de ondas electromagnéticas visíveis pelo homem e que correspondem à banda de comprimentos de onda compreendida entre os 380 nm aos 400 nm.

A quantidade de radiação visível que é emitida por uma fonte luminosa é definida como fluxo luminoso e vem expressa em lúmens (*lm*). De acordo com o IESNA, a iluminância é definida como a densidade de fluxo luminoso que incide sobre uma superfície situada a uma determinada distância. A sua unidade é o *lux* (*lx*) e representa a iluminância provocada por 1 *lm* incidente em 1 *m*² de área. Uma vez que o fluxo luminoso não se distribui uniformemente em todas as direções para efeitos de cálculo é considerada uma iluminância média.

A norma EN 12464-1³¹ define níveis de iluminância média recomendados que têm em consideração factores como idade dos ocupantes, tipo de actividade, velocidade e precisão exigidas para a tarefa a desempenhar, bem como refletância do fundo de trabalho.

Outra medida fotométrica a ter em consideração no design de sistemas de iluminação é a luminância. Esta corresponde à quantidade de luz que é refletida por uma superfície e vem expressa em unidades *decandela* . m^{-2} . A luminância é vista como um indicador da brancura de uma superfície.

1.3.6 Consumos energéticos em Iluminação

No design de projetos de iluminação são usualmente utilizados métodos luminotécnicos que nos permitem calcular o número de lâmpadas necessárias para se produzir um determinado nível de iluminância no interior de um escritório. É o caso do Método do fluxo total, também conhecido como *Método dos Lúmens*.¹⁸ Este método é bastante utilizado quando as luminárias produzem iluminação uniforme sobre o plano de trabalho. O critério de uniformidade é estabelecido quando o ponto de menor iluminação não corresponde a menos de 70% do ponto de maior iluminação.

Neste método determina-se o fluxo total de luz que é recebido no plano de trabalho, φ_r , e que está relacionado com o fluxo luminoso instalado, φ_i , pela *eq(7)*.

$$\varphi_r = \varphi_i \times FU \times FM \quad eq(7)$$

FU e *FM* representam o factor de utilização e o factor de manutenção respectivamente.

O fluxo luminoso recebido está ainda relacionado com a iluminância média e a área do recinto pela *eq(8)*.

$$E_m = \frac{\varphi_r}{A} \quad eq(8)$$

A determinação do factor de utilização compreende as seguintes etapas;

- a) Determinação do Índice do local (k);

$$k = \frac{c \times l}{h \times (c + l)} \quad eq(9)$$

c – comprimento do recinto (m);

l – largura do recinto (m);

h – distância da luminária ao plano de trabalho (m)

- b) Definição dos índices de reflexão do tecto, paredes e piso, de acordo com a sua cor;

- c) Escolha do tipo de lâmpadas e luminárias.

Para cada tipo de lâmpada e luminária existem tabelas (Anexo 6.1), desenvolvidas pelos fornecedores que estabelecem valores de factor de utilização como função do índice local e da cor dos tetos, paredes e pavimento. Ao longo do tempo, a deposição e acumulação de sujidade e poeira nas lâmpadas conduz a uma diminuição do fluxo luminoso que é emitido. O factor de manutenção contabiliza este efeito e na ausência de mais informação é usual assumir-se o valor de 0,8.

A eq(10) é uma aproximação da eq(8) e permite relacionar a iluminância média de um espaço com o valor médio de reflexão de luz das superfícies interiores (Y_m) e o fluxo luminoso recebido no plano de trabalho.

$$E_m = \frac{\varphi_r}{A \times (1 - Y_m)} \quad eq (10)$$

Considerando duas divisões A e B idênticas sendo a refletividade das superfícies interiores o único factor que as diferencia uma da outra então, as iluminâncias médias E_A e E_B relacionam-se de acordo com a eq(11).

$$\frac{E_A}{E_B} = \frac{1 - Y_B}{1 - Y_A} \quad eq(11)$$

Combinando as equações apresentadas anteriormente, o número de lâmpadas necessárias para produzir uma iluminância média na divisão A de E_A é dada pela eq(12).

$$n^{o}lâmpadas = \frac{\varphi_i}{\varphi_{lâmpada}} = \frac{E_A \times A}{FM \times FU \times \varphi_{lâmpada}} \quad eq(12)$$

$\varphi_{lâmpada}$ representa o fluxo luminoso emitido por uma lâmpada e depende do tipo de lâmpada selecionado.

O número de lâmpadas necessárias para produzir a mesma iluminância médio no interior da divisão B é determinado combinando a eq(11) e eq(12).

Quando as condições para ocorrência de múltiplas reflexões da luz são satisfeitas, pequenas diferenças no valor de reflexão da luz das tintas podem conduzir a grandes diferenças no nível de iluminância do espaço.

Resultados e Discussão

2.1 Tintas refletivas no Infravermelho para redução de consumos de energia em climatização

2.1.1 Propriedades espectrais das tintas e vernizes

Na Tabela 1 são apresentados os valores de emissividade lidos para a tinta branca ("*Tinta branca de referência*") e verniz ("*Verniz S/MR*") antes e após a incorporação de diferentes percentagens em peso de pasta de alumínio.

Tabela 1 – Valores de emissividade do revestimento de tinta antes e após a incorporação da pasta de alumínio (10 e 20 % (m/m)) numa tinta branca e verniz aquosos.

Tinta/verniz	ε	Redução
<i>Tinta branca de referência</i>	0,90	
<i>Tinta branca de referência. + 10% pasta de alumínio</i>	0,74	16 %
<i>Tinta branca de referência. + 20% pasta de alumínio</i>	0,72	18 %
<i>Verniz S/MR</i>	0,87	
<i>Verniz S/MR + 10% pasta de alumínio</i>	0,72	15 %
<i>Verniz S/MR+ 20% pasta de alumínio</i>	0,66	21%

De acordo com a Tabela 1 o *Verniz S/MR* é o que apresenta melhores resultados quando incorporados 20% (m/m) de pasta de alumínio. Estes resultados indicam que a tinta a formular deve ser suficientemente transparente na região do espectro de interesse, não penalizando assim as propriedades espectrais conferidas pelos pigmentos refletivos.

O comportamento das tintas na região do infravermelho do espectro electromagnético é fortemente influenciado pela natureza da resina e ainda pelos pigmentos selecionados. Compostos orgânicos, como é o caso da maioria das resinas utilizadas, exibem bandas de forte absorção devido a vibrações moleculares dos seus grupos funcionais.¹

Na Figura 8 é possível observar o aumento da refletância decorrente da aplicação dos pigmentos de alumínio e algumas das bandas de absorção ao longo do Infravermelho médio-longo para a *Tinta Branca de referência* e *Verniz S/MR + 20% pasta de alumínio*.

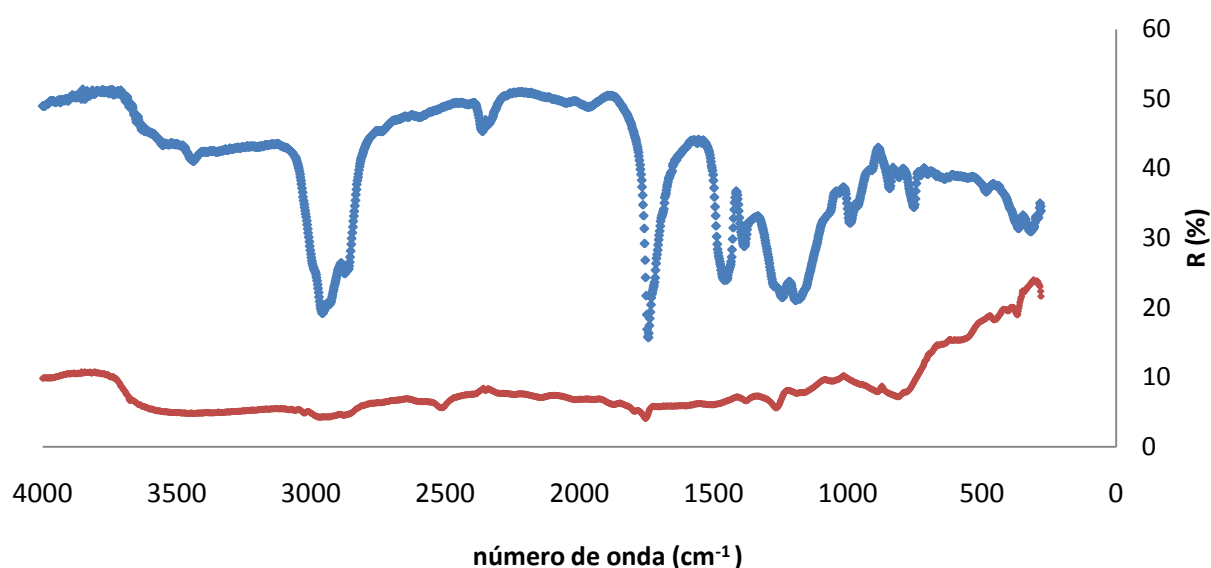


Figura 8 - Espectros de refletância no Infravermelho médio do Verniz S/MR + 20% pasta de alumínio e da Tinta Branca de referência. Verniz S/MR + 20% pasta de alumínio (●) e Tinta Branca de referência (●).

2.1.2 Reformulação do Verniz S/MR

Apesar de uma redução de 21% no valor de emissividade decorrente da aplicação da pasta de alumínio, o valor de emissividade ainda se encontra muito aquém do valor estabelecido pela ASTM para um IRCC ($\varepsilon < 0,25$).

Partindo-se de uma formulação orientativa avaliou-se a influência da orientação das partículas de alumínio nas propriedades espectrais do verniz. Neste sentido, à formulação do verniz inicial adicionou-se cerca de 5% (m/m) de um modificador reológico comercial. Este aditivo consiste numa emulsão de cera que ao ser incorporada no verniz é responsável por orientar e distribuir as partículas de alumínio paralelamente umas às outras, maximizando assim a eficiência com o filme de tinta reflete a radiação infravermelha.

Ao novo verniz - *Verniz C/MR* – foram incorporados diferentes percentagens em peso de pasta de alumínio, 5, 10, 20, 30 e 50 % (m/m).

Tabela 2 - Valores de emissividade do verniz após adição do orientador reológico - *Verniz C/MR*.

Verniz	ε	Redução
<i>Verniz S/MR</i>	0,87	
<i>Verniz C/MR + 5% pasta de alumínio</i>	0,69	18 %
<i>Verniz C/MR + 10% pasta de alumínio</i>	0,62	25 %
<i>Verniz C/MR + 20% pasta de alumínio</i>	0,56	31%
<i>Verniz C/MR + 30% pasta de alumínio</i>	0,52	35%
<i>Verniz C/MR + 50% pasta de alumínio</i>	0,49	38%

De acordo com a Tabela 2, a incorporação de um modificador reológico conduziu a uma diminuição de 10 % no valor de emissividade face ao *Verniz S/MR + 20% pasta de alumínio*. É ainda de salientar o facto de , a partir dos 20% em peso de pasta de alumínio, o decréscimo no valor de emissividade verificado não compensa a elevada concentração em alumínio, pouco viável tanto a nível económico como a nível estético.

Para além de uma baixa emissividade é conveniente que o verniz exiba refletividade moderada a alta na região do UV/VIS/NIR do espectro electromagnético de modo a se evitar o sobreaquecimento das paredes durante o verão. No verão é conveniente que a radiação solar ao incidir nas paredes seja na sua grande maioria rejeitada pela superfície.

No gráfico da Figura 9 encontram-se representados os espectros de reflectância ao longo da região UV/VIS/NIR, para cada um dos vernizes preparados. Como se pode observar a reflectância no UV/VIS/NIR aumenta à medida que se aumenta o teor em pasta de alumínio. É de salientar ainda o facto de para comprimentos de onda compreendidos entre os 800 - 1000 nm as curvas de reflectância apresentam um mínimo local. Este mínimo pode ser explicado pela deposição de uma camada natural de Al_2O_3 na superfície das partículas de alumínio, responsável por proteger o alumínio de influências atmosféricas.

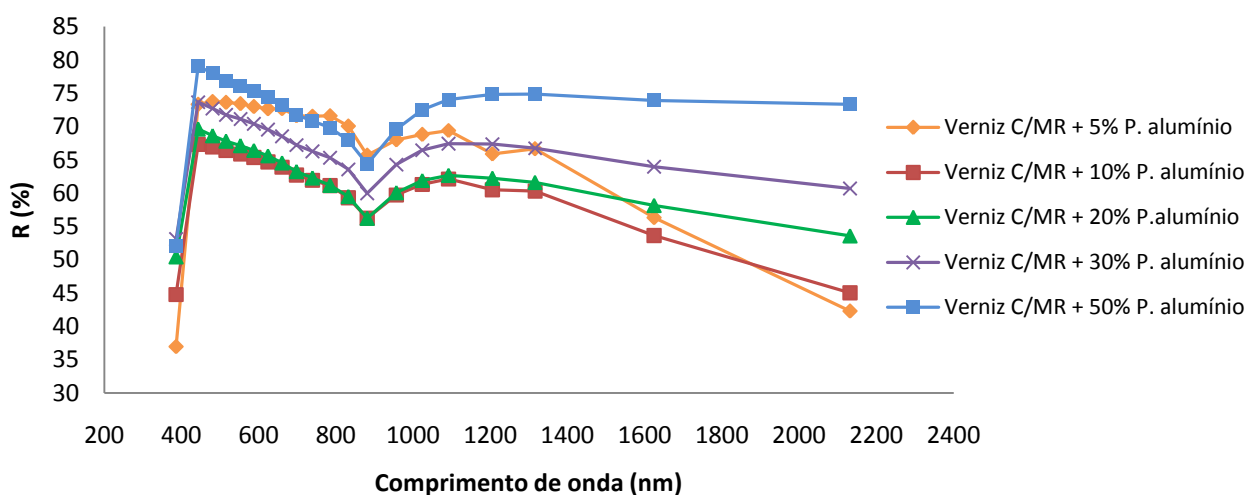


Figura 9 – Espectro de Reflectância na região do UV/VIS/NIR.

Na Tabela 3 é apresentado o valor de TSR para a carta-branca e carta-preta. A TSR representa a quantidade de energia solar que é imediatamente rejeitada pela superfície de um corpo e é determinada pela média de valores de refletância em determinados comprimentos de onda, de acordo com a eq (13).

$$TSR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho(\lambda_i) \quad eq(13)$$

Tabela 3 – Total Solar Reflectance (TSR) determinada através de medições realizadas na carta-branca (B) e na carta-preta (P).

Tinta/verniz	TSR % (B)	TSR % (P)
<i>Verniz S/MR + 20% pasta de alumínio</i>	50,05	47,69
<i>Verniz C/MR + 5% pasta de alumínio</i>	66,86	31,46
<i>Verniz C/MR + 10% pasta de alumínio</i>	60,46	47,69
<i>Verniz C/MR + 20% pasta de alumínio</i>	62,13	60,70
<i>Verniz C/MR + 30 % pasta de alumínio</i>	66,51	66,50
<i>Verniz C/MR + 50% pasta de alumínio</i>	72,73	72,62

Como se pode observar na Tabela 3 para pequenas quantidades de pasta de alumínio (verniz C/MR + 5% pasta de alumínio) as diferenças entre carta-branca e carta-preta são significativas. Assim a TSR de 66,85 % não representa a verdadeira refletividade do filme de tinta estando o valor medido a ser influenciado pelo fundo branco da carta de opacidade. É de salientar ainda que, à medida que se aumenta o teor em pasta de alumínio o valor de TSR também aumenta.

2.1.3 Cor - Natureza dos pigmentos

Uma das principais dificuldades encontradas ao longo deste projecto foi a cor do revestimento, uma vez que, a pasta de alumínio ao ser incorporada no verniz confere-lhe uma tonalidade acinzentada e um acabamento metálico bastante indesejado no interior de habitações. Na tentativa de se produzir uma gama de cores diversificada incorporaram-se diferentes pastas de pigmentos coloridos opacos e mediu-se a emissividade do revestimento colorido obtido. Verificou-se que a incorporação deste tipo de pigmentos penaliza as propriedades espectrais do revestimento, uma vez que ao cobrirem as partículas de alumínio impedem que estas reflitam convenientemente a radiação infravermelha.

A solução passa assim pela utilização de corantes transparentes. Estes, apesar de transparecerem o efeito metálico, não penalizam a reflexão de calor uma vez que são transparentes à radiação visível e infravermelha.

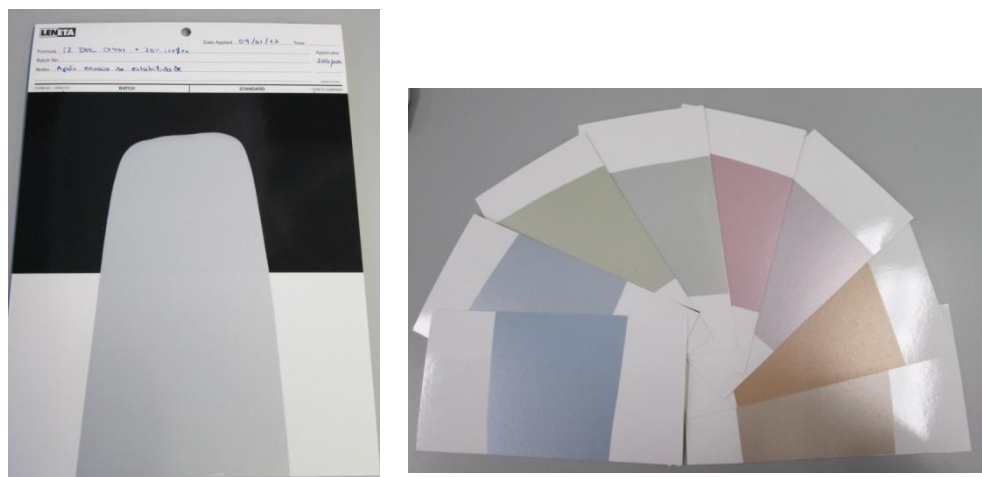


Figura 10 - Aplicação do Verniz C/OR + 20% pasta de alumínio em Carta de Leneta com uma espessura de filme húmido de $200\mu\text{m}$ e gama de cores obtidas quando adicionados os corantes transparentes.

2.1.4 Modo de Aplicação

Uma vez que a orientação das partículas de alumínio se revelou um factor determinante no valor de emissividade dos revestimentos, ponderou-se o facto de o modo de aplicação das tintas ter alguma influência nas propriedades espectrais do filme. Neste sentido, estudaram-se três tipos de aplicação diferentes, à trincha, a rolo e por fim à pistola, sendo que no último caso a tinta deve ser posteriormente diluída a 15%. Os diferentes modos de aplicação foram comparados em termos de emissividade, e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Emissividade da película de verniz C/OR em função do modo de aplicação.

Tinta	Modo de aplicação			
	Trincha	Rolo	Pistola	Pistola (diluída a 15%)
Verniz C/MR + 5% pasta de alumínio	0,69	0,65	0,69	0,70
Verniz C/MR + 10% pasta de alumínio	0,62	0,59	0,56	0,65
Verniz C/MR + 20% pasta de alumínio	0,56	0,53	0,56	0,58
Verniz C/MR + 30% pasta de alumínio	0,52	0,47	0,55	0,53
Verniz C/MR + 50% pasta de alumínio	0,49	0,36	0,49	0,48

Atendendo aos resultados é possível afirmar que para pequenas quantidades de pasta de alumínio adicionadas, o modo de aplicação não constitui um factor determinante na capacidade apresentada pela superfície em refletir radiação. Para concentrações de pasta de alumínio superiores, a aplicação a rolo foi a que conduziu a melhores resultados (emissividade mais baixa). Durante o ensaio de aplicação a pistola demonstrou não ser o método mais apropriado. Depois de aplicada a tinta, o filme apresentava separação de fases – a tinta não se distribuía uniformemente ao longo de todo o substrato, ocorrendo zonas de maior pigmentação.

2.1.5 Ensaio de estabilidade

O verniz de alumínio, depois de fabricado em laboratório - *Verniz C/MR +20% pasta de alumínio*, foi sujeito a um ensaio de estabilidade. Para tal, colocou-se o verniz numa estufa a 50°C durante 1 mês. Este teste tem como objetivo final avaliar, de um modo acelerado, o comportamento das tintas durante um período de aproximadamente 2 anos. Decorrido o tempo de ensaio procedeu-se ao controlo das propriedades do verniz nomeadamente, viscosidade de *Stormer*, no qual se verificou um aumento do seu valor de 97 unidades de *Krebs* para 99 unidades de *Krebs*. Relativamente às propriedades espectrais, no que diz respeito à emissividade da película de tinta, não se verificaram alterações sendo o valor lido de 0,53 para a aplicação a rolo. O valor de TSR sofreu um decréscimo de cerca de 8%, após o ensaio de estabilidade. Na Figura 11 são apresentadas as curvas de reflectância no UV/VIS/NIR da película de *Verniz C/MR + 20% pasta de alumínio* antes e após o ensaio de estabilidade.

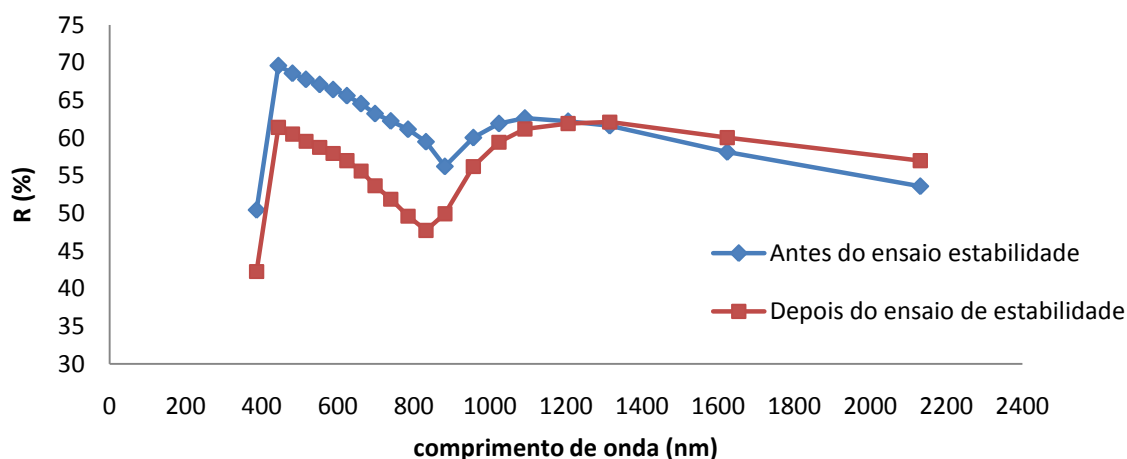


Figura 11 - Curva de refletâncias no UV/VIS/ NIR da película de Verniz C/OR +20% de pasta de alumínio antes e após o ensaio de estabilidade.

2.1.6 Simulação à escala laboratorial

2.1.6.1 Objetivo

Nesta secção do trabalho pretende-se fazer uma estimativa da redução dos consumos energéticos decorrentes da utilização da tinta em estudo – *verniz C/MR + 20% pasta de alumínio* – em alternativa a uma tinta branca convencional e que se encontra atualmente no mercado – *Tinta Branca de referência*.

2.1.6.2 Montagem

Construção de um cubo em placas de gesso cartonado de 40 x 40 cm em que duas das suas faces interiores paralelas se encontram pintadas com a *Tinta Branca de referência* e outras duas com o *verniz C/MR + 20% pasta de alumínio*.

Pelo topo do cubo, mais ou menos ao centro, foi introduzida uma lâmpada incandescente de 100 W (fonte de radiação).

No interior do cubo foram introduzidos 5 termopares de superfície a registar:

- Temperatura do ar interior;
- Temperatura da superfície pintada com *Tinta Branca de referência*;
- Temperatura da superfície pintada com *verniz C/MR + 20% pasta de alumínio*;
- Temperatura da parede pintada com *Tinta Branca de referência* – Termopar colocado entre o gesso e o cartão;
- Temperatura da parede pintada com *verniz C/MR + 20% pasta de alumínio* – Termopar colocado entre o gesso e o cartão.

Para além das temperaturas referidas anteriormente registou-se a temperatura do ar exterior. Os termopares colocados no interior do cubo foram devidamente protegidos de modo a que a radiação emitida pela lâmpada não influencie a temperatura real das superfícies.

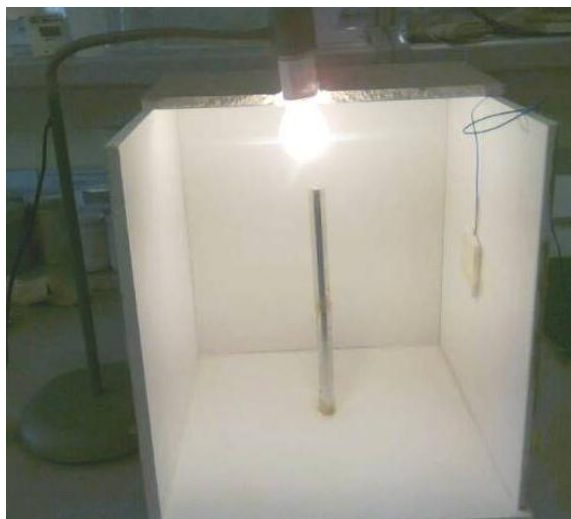


Figura 12 – Modelo do cubo construído para simulação das temperaturas do ar interior e de superfície em laboratório.

2.1.6.3 Resultados e Discussão

Recorrendo-se a um sistema de aquisição de dados registaram-se as temperaturas ao longo do tempo. Ligou-se a lâmpada incandescente até se verificar o estado estacionário e, depois de atingido desligou-se a fonte de radiação. Registaram-se as temperaturas até se atingir novo estado estacionário. A evolução de temperaturas ao longo do tempo em que decorreu o ensaio experimental é apresentada na Figura 13. Nas Tabelas 5 e 6 encontram-se as temperaturas registadas no início, no estado estacionário (S.S) e no fim do ensaio.

Tabela 5 – Temperaturas das superfícies registadas pelos termopares no início, estado estacionário e no fim do ensaio experimental.

T (°C)	$T_{s_refletiva}$	$T_{parede_refletiva}$	T_{s_branca}	T_{parede_branca}
Início	17,31	17,35	17,62	17,14
S.S	31,12	29,98	27,44	26,93
Final	15,81	15,94	16,19	15,81
$T_{s_méd}(S.S)$	30,55		27,19	

Tabela 6 - Temperaturas do ar interior e do ar exterior registadas no início, estado estacionário e no fim do ensaio experimental.

T (°C)	$T_{ar,i}$	$T_{ar,e}$
Início	18,63	13,83
S.S	43,18	14,12
Final	16,46	15,31

Para efeitos de cálculo e comparação das duas tintas foi utilizada a média das temperaturas de superfície e da parede $T_{s_{med}(S.S)}$. No estado estacionário verificou-se uma diferença de temperaturas entre a superfície pintada com *Verniz C/MR + 20 % pasta de alumínio* e a superfície pintada com *Tinta Branca de referência* de 3,36 °C.

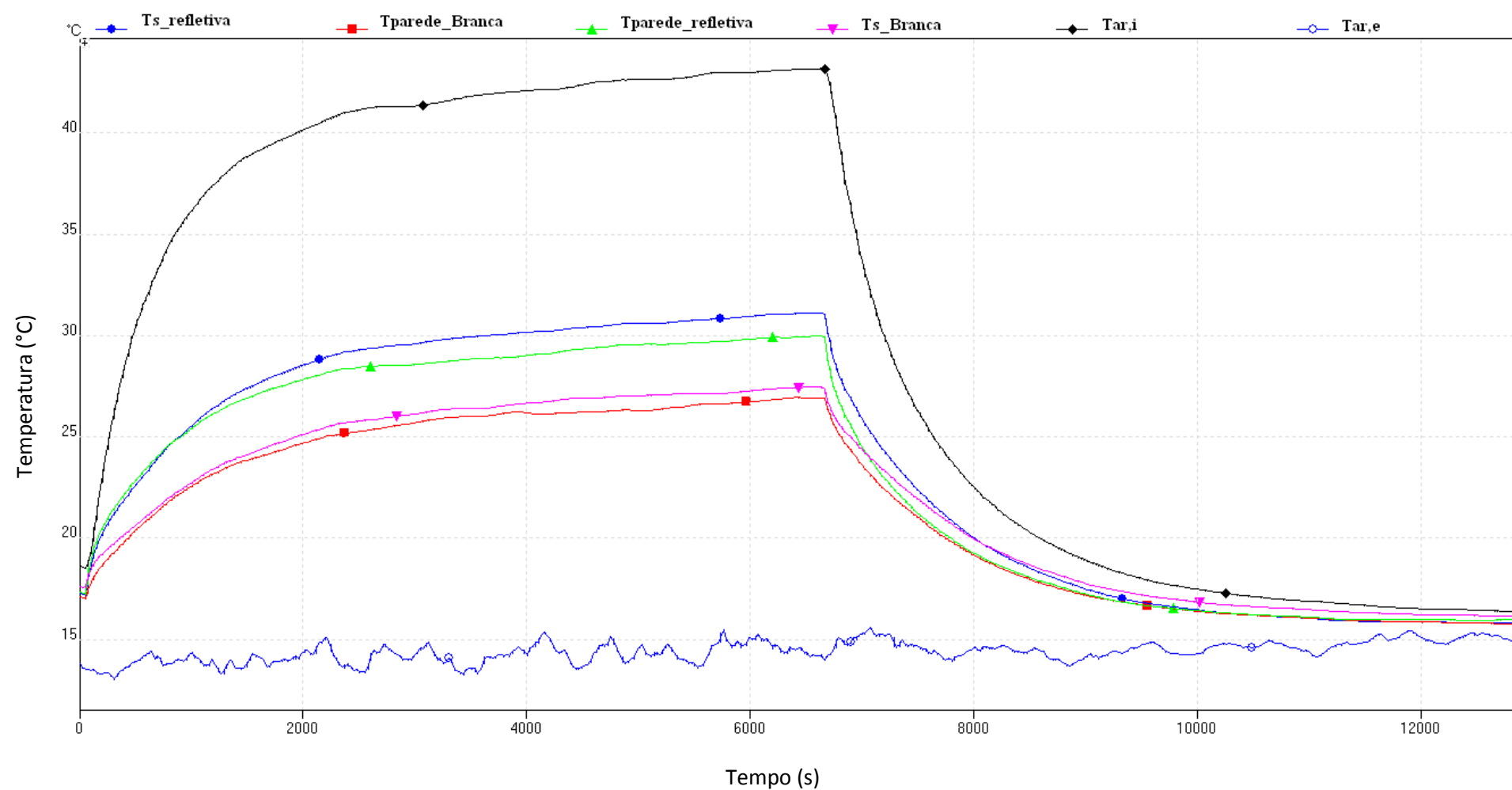


Figura 13 – Evolução das Temperaturas de superfície, do ar interior e do ar exterior ao longo do tempo.

2.1.7 Estimativa da redução de Consumos energéticos

Na Tabela 7 e 8 são apresentadas as propriedades mássicas e térmicas Das placas de gesso cartonado utilizadas no cálculo da resistência térmica de condução das paredes.

Tabela 7 - Propriedades mássicas e térmicas das placas de gesso cartonado e Resistência térmica à condução de calor.

Propriedades mássicas e térmicas	
Material	Placas de gesso cartonado
$\rho_v (kg . m^{-3})$	750 -1000
$\lambda_{térmica}(W . m^{-1} . K^{-1})$	0,25
d (m)	0,015
$R_{cond} (m^2 . K . W^{-1})$	0,06

Tabela 8 - Parâmetros utilizados a determinação das resistências térmicas superficiais interior ($R_{s,i}$) e exterior ($R_{s,e}$).¹⁶

	Tinta Branca de referência	Verniz C/MR + 20% pasta de alumínio
ε	0,90	0,53
$h_{c,i} \quad W . m^{-2} . K^{-1}$	2,50	2,50
$h_{r,i} \quad W . m^{-2} . K^{-1}$	5,98	3,58
$R_{s,i} \quad m^2 . K . W^{-1}$	0,12	0,17
$R_{s,e} \quad m^2 . K . W^{-1}$		0,08

Neste momento estão reunidas as condições para determinar as perdas de calor por m^2 de parede de *Tinta Branca de referência* e de *Verniz C/MR + 20 % pasta de alumínio*. Os cálculos foram efectuados tendo por base a equação da Resistência térmica global à transferência de calor, $eq(4)$ e os parâmetros apresentados na Tabela 8. No Anexo 6.3 é apresentado o exemplo de cálculo das perdas de calor ao longo das paredes.

Tabela 9 - Perdas de calor por m^2 de parede de *Tinta Branca de referência* e de *Verniz C/MR + 20% P. alumínio*. Poupança energética.

	Tinta branca	Verniz refletivo	Poupança (%)
q ($W \cdot m^{-2}$)	-112,69	-95,46	15,29

De acordo com os resultados apresentados é possível reduzir em cerca de 15 % as perdas de calor para o exterior pela substituição de uma tinta de interior branca por um verniz refletivo. Para além de uma redução no fluxo de calor perdido para o exterior a aplicação de um revestimento refletivo beneficia a velocidade de aquecimento contribuindo assim para uma maior poupança energética.

Na Figura 14 é apresentado parte do perfil de temperaturas (Figura 13) correspondente ao período em que se verifica uma taxa de aquecimento aproximadamente constante.

Das equações lineares ajustadas é de notar que a temperatura da superfície pintada com *verniz C/MR + 20% pasta de alumínio* aumenta a uma razão de $0,38 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ enquanto que a temperatura de superfície pintada com *Tinta Branca de referência* aumenta a uma razão de apenas $0,26 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$. Na prática seria necessário manter o sistema de aquecimento ligado durante mais tempo, cerca de $3,84 \text{ min}$, para a *Tinta branca de referência* aumentar a sua temperatura de superfície em 1°C , em oposição ao *verniz C/MR + 20% pasta de alumínio* que apenas necessitaria de cerca de $2,63 \text{ min}$.

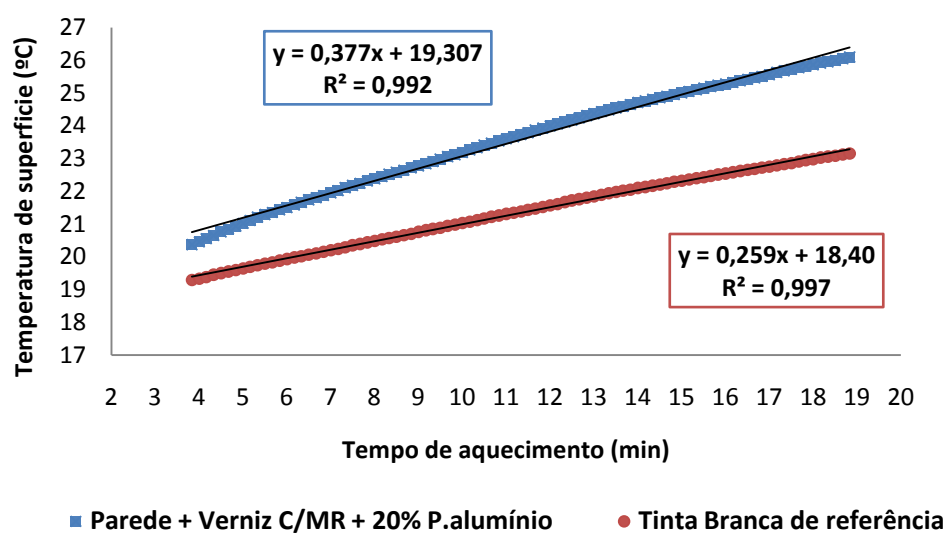


Figura 14 - Velocidade de aquecimento das superfícies pintadas com *Verniz C/OR + 20% pasta de alumínio* e com *Tinta Branca de referência*.

2.2 Tintas refletivas no Visível para redução de consumos em iluminação

2.2.1 Composição e caracterização das Tintas Brancas

Na Tabela 10 é apresentada, de um modo genérico, parte da composição das 9 tintas brancas analisadas. As tintas foram ainda comparadas em termos de teor de ligante, teor de sólidos e teor de dióxido de titânio, no entanto, não é permitida a revelação deste tipo de informação.

Tabela 10 – Natureza do ligante; tipo de cargas e PVC das tintas brancas analisadas

Tinta	Resina	Tipo de pigmentos/cargas	PVC
Tinta A	Estireno-acrílica	TiO ₂ ; talco; CaCO ₃ ; Ext1; Ext2; Ext3	66,2
Tinta B	Estireno-acrílica	TiO ₂ ; CaCO ₃ ; Ext1	68,3
Tinta C	Acrílica	TiO ₂ ; Ext4	41,4
Tinta D	Acrílica	TiO ₂ ; talco; CaCO ₃ ; Ext5	46,1
Tinta E	Acrílica	TiO ₂ ; talco; CaCO ₃	43,3
Tinta F	Vinílica	TiO ₂ ; talco; CaCO ₃	77,9
Tinta G	Vinílica	TiO ₂ ; talco; CaCO ₃	64,7
Tinta H	Vinílica	TiO ₂ ; talco; CaCO ₃ ; Ext1; Ext3; Ext5; Ext6	63,0
Tinta I	Vinílica	TiO ₂ ; talco	38,4

Na Tabela 11 são apresentados os valores de luminosidade obtidos para cada tinta de acordo com o iluminante padrão seleccionado.

Tabela 11 - Valores de luminosidade obtidos para cada tipo de iluminante padrão.

Tinta	L*		
	D65	A	CWF
<i>Tinta A</i>	95,18	95,21	95,19
<i>Tinta B</i>	94,10	94,20	94,13
<i>Tinta C</i>	96,51	96,50	96,50
<i>Tinta D</i>	95,85	95,82	95,83
<i>Tinta E</i>	95,42	95,40	95,40
<i>Tinta F</i>	96,42	96,45	96,44
<i>Tinta G</i>	96,36	96,37	96,37
<i>Tinta H</i>	96,31	96,32	96,32
<i>Tinta I</i>	95,16	95,21	95,18

Como é possível observar na Tabela 11 as diferenças obtidas entre os valores de luminosidade lidos para as diferentes tintas brancas são muito pequenas. No entanto, pelo que foi averiguado, pequenas diferenças no valor de reflexão da luz podem conduzir a grandes diferenças no nível de iluminação produzido.

2.2.2 Influência da Natureza do ligante

Como já foi referido anteriormente o fenómeno de dispersão da luz é favorecido pelo aumento da diferença entre o índice de refração do pigmento branco, dióxido de titânio e o índice de refração da resina utilizada.

Na Tabela 12 encontram-se os índices de refração das diferentes resinas utilizadas.

Tabela 12 – Índices de refração das resinas utilizadas

Resina	Índice de refração
Acrílica	1,60
Estireno-acrílica	1,18
Vinílica	1,40

De acordo com a informação apresentada na Tabela 12 seria de esperar que as tintas brancas formuladas com resinas de origem estireno – acrílica fossem as que exibissem melhor comportamento, isto é, apresentassem maior luminosidade. No entanto, o mesmo não se verifica, visto o maior valor de luminosidade ter sido obtido para a tinta *Tinta C (Acrílica)* e ainda as tintas de origem vinílica apresentarem, de um modo geral, melhores resultados. O mesmo indica que, neste caso a natureza da resina não é determinante no valor de luminosidade lido e que existe algo mais na formulação a influenciar a capacidade da película de tinta em refletir a luz visível.

De modo a confirmar esta teoria, na formulação da tinta *Tinta A* substitui-se a resina original por uma resina de origem vinílica e na Tinta H procedeu-se exactamente à substituição contrária. Fabricaram-se em laboratório as novas tintas designadas de *Tinta A2 (vinílica)* e *Tinta H2 (estireno-acrílica)* e uma vez estabilizadas aplicaram-se em cartas de Leneta e mediu-se o seu valor de luminosidade.

Da substituição de uma resina de natureza estireno- acrílica por uma resina de natureza vinílica verificou-se um aumento de luminosidade de cerca de 1%, Tabela 13.

Na comparação da *Tinta A* com a respectiva modificação (*Tinta A2 vinílica*) procurou-se minimizar as diferenças entre as condições de fabrico e a eficiência de dispersão do pigmento, uma vez que a primeira foi produzida em fábrica e a segunda em laboratório. Assim, procedeu-se ao fabrico da *Tinta A (laboratório)* em laboratório.

Como é possível observar na Tabela 13 as diferenças obtidas entre a *Tinta A2 (vinílica)* e *Tinta A (laboratório)* não são significativas.

Tabela 13 – Influência da natureza da resina na luminosidade da Tinta A

Tinta	L*		
	D65	A	CWF
<i>Tinta A</i>	95,18	95,21	95,19
<i>Tinta A2(vinílica)</i>	96,15	96,17	96,16
<i>Tinta H2 (estireno-acrílica)</i>	96,24	96,24	96,24
<i>Tinta A (laboratório)</i>	95,91	95,93	95,89

A substituição da resina de natureza vinílica por uma resina estireno-acrílica (*Tinta H2*) não introduziu alterações significativas no valor de luminosidade. Assim, confirma-se a conclusão anterior de que algo mais na formulação das tintas está a influenciar o valor de Luminosidade.

2.2.3 PVC e porosidade das tintas

Nesta secção do trabalho será avaliada a influência da razão PVC/ CPVC na porosidade do filme de tinta e na capacidade de reflexão das tintas brancas.

Quando analisamos separadamente as tintas por tipo de ligante, é possível ver uma clara relação entre o PVC e a luminosidade medida das tintas. Por exemplo para as tintas formuladas com ligante de natureza vinílica, à medida que a relação PVC/ CPVC aumenta, aumenta também L*. Como já foi referido anteriormente quando o PVC se encontra acima de CPVC aumenta a ocorrência de poros de ar e, conseqüentemente a diferença entre o índice de refração dos

pigmentos e o índice de refração do meio (ar) é largamente ampliada. O mesmo favorece o fenómeno de dispersão da luz pelo filme de tinta.

Tabela 14 – CPVC; razão PVC/CPVC e índice de porosidade do filme de tinta

Tinta	L* (D65)	CPVC (%)	PVC/CPVC	Índice Porosidade
<i>Tinta A</i>	95,18	55,6	1,2	0,36
<i>Tinta B</i>	94,10	65,5	1,0	0,12
<i>Tinta C</i>	96,51	63,2	0,7	(*)
<i>Tinta D</i>	95,85	54,5	0,8	(*)
<i>Tinta E</i>	95,42	64,0	0,7	(*)
<i>Tinta F</i>	96,42	61,5	1,3	0,55
<i>Tinta G</i>	96,36	58,9	1,1	0,22
<i>Tinta H</i>	96,31	58,1	1,1	0,19
<i>Tinta I</i>	95,16	41,6	0,9	(*)

(*) Tinta formulada abaixo de CPVC e por isso não faz sentido determinar o índice de porosidade.

O índice de porosidade do filme, como era de esperar é diretamente proporcional à razão PVC/CPVC e fornece informação adicional acerca das moléculas de ar que se encontram aprisionadas no filme de tinta e que contribuem para um aumento de reflexão da luz. Nas tintas de origem acrílica o PVC encontra-se abaixo do CPVC, as tintas são mais densas e o aumento de luminosidade da *Tinta C* não pode ser explicado pela diferença de índices de refração.

Até ao momento ainda não se conseguiu apontar uma explicação para o facto da *Tinta C* ser a que apresenta maior luminosidade face às restantes. Analisando a sua composição ressaltou o facto de esta ser a tinta que apresenta maior teor em dióxido de titânio. Acrescidamente, a *Tinta C* é a única que possui na sua composição a carga *Ext 4*. De forma a confirmar se a carga *Ext4* está na origem do elevado valor L* apresentado, procedeu-se ao fabrico da mesma tinta mas substituiu-se a carga *Ext4* por talco.

Tabela 15 - Influência da substituição do Ext4 por talco na formulação da Tinta C.

Tinta	L*		
	D65	A	CWF
<i>Tinta C</i>	96,51	96,50	96,50
<i>Tinta C (talco)</i>	96,06	96,02	96,04

Como é possível observar na Tabela 15 a substituição do *Ext4* por talco não introduziu grandes alterações no valor de luminosidade lido.

2.2.4 Luminosidade vs Cor

Como é do conhecimento geral as tintas brancas apresentam elevados valores de reflexão da luz visível e, por este motivo constituem uma escolha inteligente quando se pretende tornar as divisões de uma casa aparentemente mais luminosas e espaçosas. No entanto, quando se fala de decoração não se pode por de lado a questão estética e principalmente o facto de os ocupantes desejarem simultaneamente luminosidade e cor nas suas habitações. Neste sentido procurou-se correlacionar o teor em pigmentos opacos coloridos com a luminosidade da cor.

Para tal, adicionaram-se diferentes concentrações (0; 0,025%; 0,05%; 0,1%; 0,25 % (m/m)) de 4 pastas de pimento orgânico diferentes à *Tinta H*. Mediram-se as respectivas luminosidades e traçou-se um gráfico de luminosidade (L^*) em função da percentagem de pigmento orgânico colorido adicionado, Figura 15. Traçou-se uma linha de tendência e verificou-se que a função polinomial de segundo grau constitui a melhor aproximação ao conjunto de pontos.

A partir das equações obtidas é possível determinar a concentração máxima de pigmento orgânico que é possível adicionar à tinta de modo a que esta apresente uma luminosidade de pelo menos 96%.

Como se pode observar no gráfico da Figura 15 a luminosidade da tinta é influenciada de forma diferente, dependendo da cor do pigmento utilizado. O mesmo se deve ao facto de o olho

humano apresentar sensibilidade máxima à luz, por volta dos 555 nm (zona do amarelo). De acordo com a curva de eficácia luminosa (CIE), a sensibilidade vai diminuindo à medida que nos aproximamos dos comprimentos de onda limite da zona do visível (zona do azul e do vermelho).

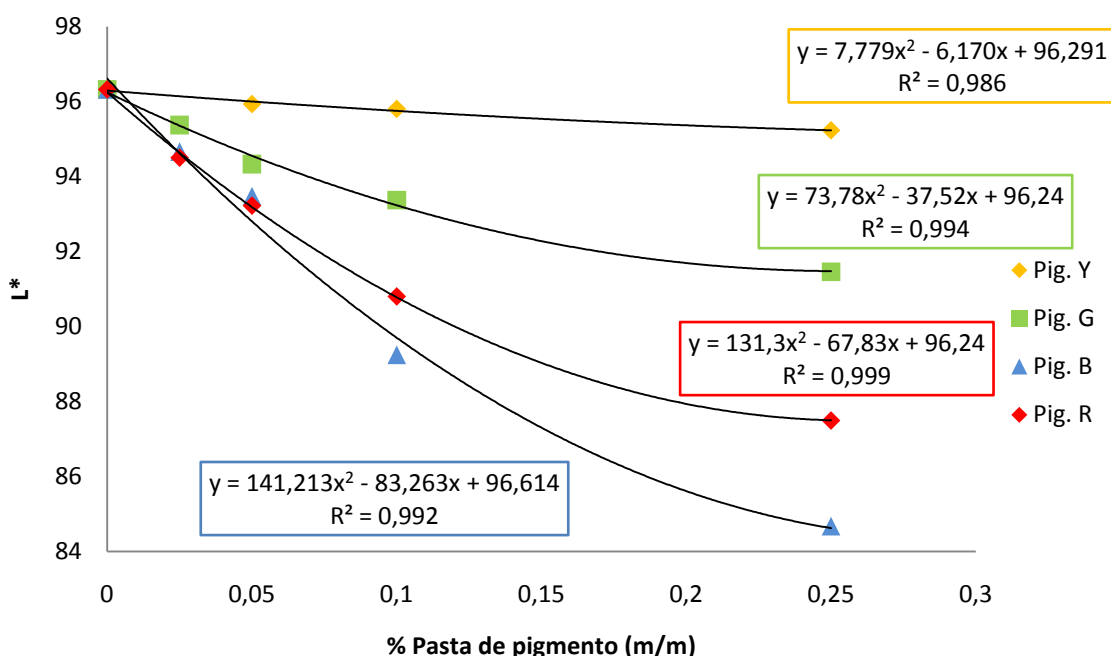


Figura 15 - Curvas de luminância da película de tinta em função da % de Pasta de pigmento orgânico amarelo (Pig.Y), verde (Pig. G); azul (Pig. B) e vermelho (Pig.R) adicionada à Tinta H

2.2.5 Pigmentos Fluorescentes

No decorrer da pesquisa bibliográfica o uso de pigmentos fluorescentes surgiu como uma boa alternativa quando se pretende aumentar a luminância de uma cor, mantendo o mesmo nível de saturação.

O fenómeno de fluorescência é caracterizado pela absorção de radiação, geralmente em comprimentos de onda menores (zona UV) e emissão de luz numa região particular do espectro do visível. Neste âmbito foi colocada a seguinte hipótese:

- Pela utilização de pigmentos fluorescentes é possível aumentar a saturação e luminância da cor através da emissão de luz na região de interesse do espectro electromagnético. Assim, é possível diminuir a concentração de pigmentos orgânicos usada e

consequentemente a quantidade de radiação que é absorvida pelos mesmos e que penaliza a luminosidade da cor.

Experimentalmente testou-se o fabrico da *Tinta H* com diferentes percentagens em peso de pigmento fluorescente amarelo (0,05; 0,1; 0,5 e 1% (m/m)). Como é possível observar no gráfico da Figura 16 a utilização do Pig. Y fluorescente potencializa o valor de luminosidade e, para a máxima concentração de pigmento fluorescente adicionada o filme de tinta consegue refletir até 99% da luz incidente.

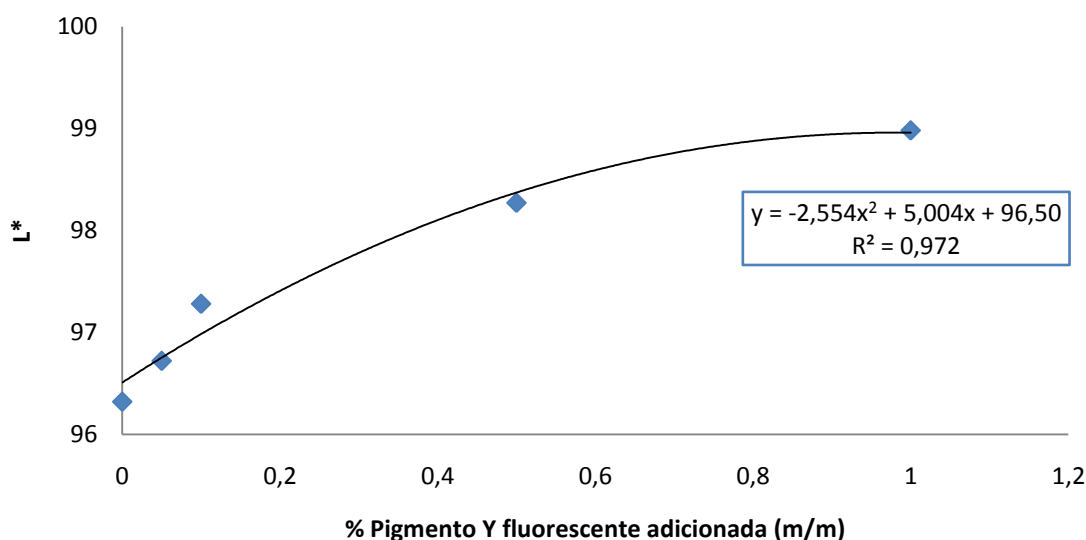


Figura 16- Influência da % Pigmento Y fluorescente na luminosidade da película de *Tinta H*.

2.2.6 Estimativa do consumo de energia em iluminação

2.2.6.1 Cenário 1: Escritório

Nesta secção do trabalho pretende-se aplicar o método de cálculo luminotécnico selecionado, método do fluxo total, a um recinto projetado para funcionar como um escritório. As tarefas desempenhadas no espaço envolvem a escrita, dactilografia, tratamento de dados e uso de computador que, segundo a norma EN 12464-1, exigem uma iluminância média de 500 lux.

Na Tabela 16 são apresentadas as dimensões do espaço, bem como o índice local, determinado a partir da $eq(9)$.

Tabela 16 - Dimensões do recinto e valor do índice local

Medidas	Dimensão (m)	Índice local (k)
Comprimento	25	3,76
Largura	10	
Pé-direito	2,7	
Altura do plano de trabalho	0,8	

No que diz respeito à refletividade do tecto e pavimento assumiu-se o valor de 80% e 30% respectivamente.

A luminária selecionada consiste num refletor em chapa de alumínio onde são embutidas duas lâmpadas fluorescentes tubulares de 32 W. Cada lâmpada de 32 W produz um fluxo luminoso de 2350 lm. De acordo com as especificações apresentadas e recorrendo à Tabela 20 do Anexo 6.1 tem-se que, nestas condições o factor de utilização toma o valor de 0,89.

2.2.6.2 Poupança energética em iluminação do Cenário 1

A percentagem de poupança em iluminação associada ao Cenário 1 é determinada de acordo com razão entre a iluminância produzida pela *Tinta A*; *Tinta C* e *Tinta H* e a iluminância produzida pela *Tinta B* tomada, neste caso como tinta de referência por apresentar o menor valor de L^* .

Os valores de L^* utilizados dizem respeito à quantidade de luz refletida pelos filmes de tinta quando utilizado o iluminante CWF, garantindo-se assim uma maior proximidade entre o iluminante padrão e o iluminante selecionado para o cálculo luminotécnico.

Na Tabela 17 é apresentado o rácio entre as iluminâncias médias produzidas pelas tintas A, C e H face à tinta de referência e o fluxo luminoso que é necessário instalar para se obter uma iluminância média de 500 lux.

Tabela 17 - Rácio entre as iluminâncias médias produzidas pelas tintas e fluxo luminoso instalado (lm).

Tinta	L*	$\frac{E_{tinta}}{E_B}$	φ_i (lm)
Tinta B	94,13	1,00	175561,80
Tinta A	95,19	1,22	143858,99
TintaH	96,32	1,59	110062,59
TintaC	96,50	1,68	104679,10

Os cálculos de consumos energéticos em iluminação tiveram em consideração que as lâmpadas se encontram ligadas por um período de 10 h por dia.

Tabela 18 - Consumos energéticos em iluminação e poupança associada para cada tinta comparativamente à tinta de referência

Tinta	Nº de lâmpadas	KWh consumidos/ano	Poupança (€/ano)	Redução
Tinta B	74	8643	-----	-----
Tinta A	61	7125	197	18 %
Tinta H	46	5373	425	38 %
Tinta C	44	5139	456	41 %

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 18 garantindo um mesmo nível de iluminância é possível reduzir em 41% os consumos de energia em iluminação pelo simples facto de se aumentar a luminosidade de uma superfície pintada de 94% para 97%.

2.2.6.3 Cenário 2: Habitação (T2)

Nesta secção do trabalho pretende-se determinar o número de lâmpadas necessárias para produzir uma iluminância de 150 lux no interior de uma habitação com uma área total de 100 m².

Para iluminantes seleccionaram-se lâmpadas incandescentes de tungsténio de 40 e 60 W. Os factores de utilização foram determinados de acordo com Tabela 21 (Anexo 6.1) para uma refletância de tecto e paredes de 70% e 50% respetivamente e são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Distribuição da área total pelas diferentes divisões da habitação. Factor de utilização e factor de manutenção.

Divisões	Área (m ²)	Índice local (k)	FU	FM
Cozinha	16	1,05	0,43	0,8
Sala	30	1,44	0,51	
Quarto (2)	15	0,99	0,43	
Casa de banho (2)	12	0,90	0,43	

2.2.6.4 Poupança energética em iluminação do Cenário 2

O cálculo da poupança energética decorrente da aplicação de revestimentos refletivos na zona do visível no interior das habitações foi realizada seguindo a mesma metodologia que a utilizada no Cenário 1: Escritório.

A luminosidade e o rácio entre a iluminância produzida pela tinta em questão e a iluminância produzida pela tinta de referência (Tinta B) são apresentados na Tabela 17.

A determinação da poupança (€/ano) em iluminação teve em consideração que as lâmpadas se encontram ligadas durante um período de 4 horas, para a cozinha, sala e quartos e um período de 3 horas para a casa de banho. Considerou-se ainda um custo de energia de 0,13€/kWh.

Na Tabela 20 são apresentados os resultados obtidos quando utilizadas lâmpadas incandescentes de 40 W e 60W. Constatou-se que é possível reduzir até 49% e 53 % os consumos de energia em iluminação quando utilizadas lâmpadas incandescentes de 40 e 60 W respetivamente, pelo simples aumento de luminosidade de 94% para 97%. Acrescidamente é de salientar o facto de 49 lâmpadas de 40 W quando utilizada a tinta H, produzirem a mesma iluminância que 56 lâmpadas de 60W quando utilizada a Tinta A. Pela selecção de uma tinta mais

luminosa para além de se reduzir o número de lâmpadas necessárias é ainda possível reduzir a potência das lâmpadas instaladas, o que no caso referido anteriormente, se traduz numa poupança de 248,64 € ao fim de um ano.

Tabela 20 – Consumos energéticos em iluminação e poupança associada a cada tinta em comparação com a tinta de referência, para o Cenário 2: Habitação (T2)

Tinta	Divisões	L. Incandescentes de 60 W				L. Incandescentes de 40 W			
		Nº de Lâmpadas	KWh consumidos/ano	Poupança (€/ano)	Redução	Nº de Lâmpadas	KWh consumidos/ano	Poupança (€/ano)	Redução
Tinta B	Cozinha	12	1051	-----	-----	13	759	-----	-----
	Sala	19	1664			21	1226		
	Quarto	11 (x2)	1927			12	1402		
	Casa de banho	9 (x2)	1183			10	876		
	Total	71	5825			78	4263		
Tinta A	Cozinha	9	788	159,43	21%	11	642	98,70	18%
	Sala	15	1314			17	993		
	Quarto	9 (x2)	1577			10	1168		
	Casa de banho	7 (x2)	920			8	701		
	Total	56	4599			64	3504		
Tinta H	Cozinha	7	613	296,09	39%	8	467	204,98	37%
	Sala	12	1051			13	759		
	Quarto	7 (x2)	1226			8	934		
	Casa de banho	5 (x2)	657			6	526		
	Total	43	3548			49	2686		
Tinta C	Cozinha	6	526	404,27	53%	7	409	269,52	49%
	Sala	9	788,4			11	642		
	Quarto	5 (x2)	876			6	701		
	Casa de banho	4 (x2)	526			5	438		
	Total	33	2716			40	2190		

Conclusões

O presente trabalho permitiu numa primeira fase a formulação de uma tinta de alumínio de baixa emissividade na região do infravermelho do espectro electromagnético. Primariamente pretendia-se que a tinta apresentasse propriedades espectrais, nomeadamente emissividade e TSR, que nos permitissem caracteriza-la segundo a *ASTM* como um *IRCC* ($\varepsilon < 0,25$). No entanto o valor mínimo obtido de emissividade foi de 0,53 para o *Verniz C/OR + 20% P. alumínio* em oposição à *Tinta Branca de referência* que apresenta valores que rondam os 0,90.

Durante o estudo averiguou-se que a adição de um modificador reológico e a transparência do filme de tinta à radiação infravermelha (ausência de cargas e dióxido de titânio) potenciam as propriedades espectrais da tinta, tendo-se por este motivo optado pela formulação de um verniz.

Uma vez que a orientação das partículas de alumínio se revelou um fator determinante no seu desempenho, decidiu-se avaliar a influência do modo de aplicação da tinta no valor de emissividade. Concluiu-se que, apesar de não introduzir alterações significativas a aplicação a rolo é o método mais adequado.

Um dos principais obstáculos com que nos deparámos neste projecto foi o facto de não ser possível adicionar pigmentos coloridos opacos à tinta, uma vez que estes ao cobrirem os pigmentos de alumínio penalizam a eficiência com que estes refletem a radiação incidente. Para a obtenção de uma gama de cores teve-se então de recorrer a corantes transparentes. Estes para além de um leque menos abrangente de cores deixam transparecer o efeito metálico do alumínio, conferindo um acabamento bastante indesejado no interior das habitações. Apesar disso, uma futura comercialização destas tintas não deve ser posta de parte podendo vir a ser de útil aplicabilidade em pavilhões industriais e desportivos.

De forma a estimar a redução de consumos de energia em aquecimento, simulou-se à escala laboratorial um modelo em placas de gesso cartonado revestido interiormente pelo *Verniz C/MR + 20% P.alumínio* e *Tinta Branca de referência*. No estado estacionário verificou-se uma diferença de temperaturas entre as superfícies interiores pintadas com *Verniz C/MR +20% P. alumínio* e as superfícies pintadas com *Tinta Branca ref.* de 3,4 °C. Estimaram-se as perdas de calor para o exterior e verificou-se que é possível diminuir o seu valor em cerca de 15% pela aplicação do *Verniz C/MR +20% P. alumínio*.

De forma a validar os resultados obtidos, futuramente seria de relativa importância que recorrendo a um simulador comercial, como é o caso do *Design Builder* se avaliasse o impacto do verniz formulado nas temperaturas do ar interior de uma habitação.

Numa segunda fase do projeto procurou-se correlacionar a composição de 9 tintas brancas com o valor de refletância no visível (luminosidade). Concluiu-se que a natureza da resina não é um factor determinante no valor lido de luminosidade, sendo que as tintas de origem vinílica apresentam de um modo geral melhores resultados. No que diz respeito à razão PVC/CPVC concluiu-se que, para tintas de origem vinílica quanto maior a razão maior o valor de luminosidade apresentado pelo filme. O mesmo se deve a uma maior ocorrência de poros de ar que aumentam a diferença entre os índices de refração do pigmento e do meio e, consequentemente aumentam a capacidade do filme em dispersar luz.

Como seria de esperar, verificou-se que um aumento na concentração de pigmentos orgânicos coloridos penaliza a luminosidade das tintas e que a partir do ajuste de funções polinomiais de 2ª ordem é possível determinar a concentração máxima de pigmento que é possível adicionar para se obter um valor de luminosidade de pelo menos 96%.

Acrescidamente concluiu-se que a incorporação de pigmentos fluorescentes permite a obtenção de cores simultaneamente saturadas e mais luminosas.

Numa fase final do projeto determinou-se a poupança energética decorrente da aplicação de superfícies de elevada refletividade no visível num escritório e numa habitação (T2). Verificou-se que num escritório com 250 m² de área, um aumento de refletividade de 94% (Tinta B) para 97% (Tinta C) permite uma poupança de 456 € ao fim de um ano, valor a que equivale uma redução de 41% nos consumos energéticos. Para uma habitação (T2) com 100 m² de área é possível reduzir até 53% os consumos de energia em iluminação, valor que corresponde uma poupança de 404,07 € ao final de um ano.

Este trabalho demonstra a versatilidade que o sector das tintas de interior apresenta para fazer face aos consumos preocupantes de energia no interior dos edifícios. As duas alternativas apresentadas são passíveis de ser utilizadas em simultâneo maximizando a poupança energética global que é conseguida.

Descrição Experimental

3.1 Tintas refletivas no Infravermelho

Numa primeira fase incorporaram-se 5%, 10% e 20% em peso de pasta de alumínio num verniz acrílico de base aquosa e numa Tinta Branca de referência vinílica de base aquosa. De seguida caracterizaram-se os revestimentos de acordo com as suas propriedades espectrais, nomeadamente Refletância UV/VIS/NIR, Refletância FTIR e emissividade.

3.1.1 Refletância UV/VIS/NIR

O verniz e tinta de alumínio foram aplicados em cartas de Leneta com uma espessura húmida de 200 μm . As cartas de Leneta são superfícies inertes divididas em duas partes, uma delas de fundo branco e outra de fundo preto e que permitem entre outras propriedades avaliar a razão de contraste e consequentemente a opacidade do filme de tinta.

Foram realizadas duas leituras por fundo (branco/preto) num espectrofotómetro UV/VIS/NIR – Modelo *Lambda 750 PerkinElmer* – para 20 comprimentos de onda pré-estabelecidos.²².

3.1.2 Refletância FTIR

Os espectros de refletância difusa no infravermelho intermédio (zona compreendida entre os 4000 e os 285 cm^{-1}) foram obtidos recorrendo-se a um espectrofotómetro FTIR – Modelo Mattson 7000. As leituras foram efetuadas em cartas de Leneta seguindo o mesmo procedimento que na determinação da refletância no UV/VIS/NIR. Os espectros obtidos são caracterizados por apresentarem bandas correspondentes à absorção de radiação por parte das moléculas orgânicas que é convertida em energia vibracional e rotacional molecular. As ligações de cada grupo funcional vibram a comprimentos de onda característicos permitindo, através da análise das bandas, a identificação do composto em questão.

3.1.3 Emissividade

Para a determinação do valor de emissividade, a tinta e verniz de alumínio foram aplicados à trincha em duas chapas de alumínio (6 x 6 cm). Durante a aplicação procurou-se garantir uma boa espessura do filme, entre 5 a 6 demãos de tinta, de modo a se obter opacidade completa. Passados 7 dias de cura foram realizadas duas leituras por chapa e tomou-se como valor final a sua média. Para este efeito recorreu-se a um emissómetro – Modelo *AE1 da Devices and Services Company*, apresentado na Figura 17.



Figura 17 – Emissómetro AE1 *Devices and Services Company*

O emissómetro funciona pela transmissão de radiação infravermelha térmica ao substrato e o valor de emissividade do revestimento é atingido quando o detector se encontra em equilíbrio térmico com o substrato ($\sim 82^{\circ}\text{C}$). Este método baseia-se no princípio de que para uma determinada temperatura de equilíbrio, a emissividade térmica se relaciona com a refletividade de acordo com a lei de Kirchoff. Antes de ser utilizado, o equipamento é previamente calibrado com um padrão de alumínio de $\varepsilon = 6\%$ e um padrão preto de $\varepsilon = 89\%$.

3.2 Tintas Refletivas no Visível

Numa fase inicial selecionaram-se nove tintas brancas atualmente comercializadas pela CIN e, recorrendo-se a um espectrofotómetro utilizado pela colorimetria – Modelo *MacBeth CE3100* - determinou-se o valor de luminosidade de cada tinta para três iluminantes diferentes. Este equipamento permitiu ainda a avaliação de outros parâmetros como a razão de contraste, índice de brancura e índice de amarelecimento dos revestimentos.

Os iluminantes seleccionados foram, o iluminante D65, o iluminante A e o iluminante CWF. O iluminante D65 representa a luz do dia e apresenta uma temperatura de cor correlacionada de 6500 K. O iluminante A, por sua vez, destina-se a representar uma lâmpada doméstica de tungsténio cuja temperatura de cor correlacionada é de cerca de 2856 K. O iluminante CWF representa uma lâmpada branca fria cuja temperatura de correlacionada é de cerca de 4000 K. O espectrofotómetro fornece-nos informação sobre os parâmetros de cor do sistema CIELAB e ainda a curva de reflectância do revestimento em cada comprimento de onda da região do UV e VIS.

3.3 Controlo de Qualidade

Algumas das tintas referidas foram reproduzidas em laboratório tendo-se utilizado, para esse efeito, um dispersor responsável pela mistura física dos diferentes componentes da tinta, como o apresentado na Figura 18.



Figura 18 - Dispersor utilizado no fabrico das tintas

Após o fabrico e depois de estabilizada a tinta é feito um controlo de qualidade (pH, viscosidade e massa volúmica).



Figura 19 - Equipamento utilizado no controlo de pH das tintas fabricadas.

Na Figura 19 é apresentado o equipamento que foi utilizado no controlo de pH das tintas fabricadas. O equipamento deve ser previamente calibrado com duas soluções padrão de pH =7 e pH=10 e de seguida introduz-se o eléctrodo na tinta a analisar. Aguarda-se até o valor de pH estabilizar e toma-se o valor final. O pH das tintas encontra-se geralmente compreendido entre 8,5 e 9,5 quando o mesmo não se verifica procede-se a um acerto de pH adicionando uma base.

Depois do controlo de pH é feito um controlo de viscosidade das tintas fabricadas. Na Figura 20 é apresentado o equipamento utilizado na determinação da viscosidade de Stormer a uma temperatura de 25°C. A viscosidade é apresentada em unidades de Krebs (KU).



Figura 20 - Viscosímetro de Stormer

Procedimento:

Colocar o recipiente de tinta e, recorrendo à manivela, baixar a haste (responsável por gerar as revoluções) até que a superfície da amostra atinja a marca estabelecida. Efetuar a leitura de viscosidade garantindo que o nível a que a haste se encontra mergulhada se mantém constante.

Na Figura 21 é apresentado o equipamento utilizado na determinação da viscosidade dinâmica de cone e placa de revestimentos para gradientes de velocidade elevados. A temperatura da placa é ajustada a 25°C e o valor de viscosidade é expressa em unidades de Poise.



Figura 21 - Viscosímetro ICI – Cone & Plate

Procedimento:

Ajustar a temperatura da placa a 25°C. De seguida, através da alavanca subir o cone e colocar 2 a 3 gotas da tinta a ensaiar no centro da placa (evitar a formação de bolhas de ar). Baixar o cone e aguardar uns segundos até que a amostra atinja a temperatura pretendida. Pressionar o botão e ler o valor de viscosidade quando este se mantiver constante.

Bibliografia

- [1] JORNAL OFICIAL DA UNIÃO EUROPEIA. Directiva 2010/31/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação).
- [2] DIRECÇÃO-GERAL DE ENERGIA E GEOLOGIA. Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010. Lisboa: INE.
- [3] CAMELO, F., PINA DOS SANTOS, C., RAMALHO, A., HORTA, C., GONÇALVES, H., MALDONATO, E. Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. Lisboa: INETI.
- [4] Reflective Insulation Radiant Barriers and Radiation Control Coatings, Understanding and Use. Phoenix: RIMA. (consultado em Novembro 2012). Disponível em:
<http://www.bizofol.com/RIMA%20Handbook.pdf>
- [5] http://www.ips-innovations.com/low_emissive_wall_coatings_ref.htm (consultado em Novembro de 2012).
- [6] SIEGEL, R., LEWIS, R. H. – Thermal Radiation Heat Transfer: The Blackbody, Electromagnetic Theory, and Material Properties. Washington, D.C.: 1968. Vol.1.
- [7] WAKE, L.V., BRADY, R.F. – Formulating Infrared Coatings for Defence Applications. Australia: DSTO Materials Research Laboratory, 1993.
- [8] KOLESKE, J. V. – Gardner Sward Handbook: Paint and Coating Testing Manual. 14ª ed.
- [9] SCHLENK – Pigments or Coatings: World of Metallics. Germany, 2012.
- [10] American Society for Testing Materials, ASTM C1321 – 09, Standard Practice for Installation and Use of Interior Radiation Control Coating Systems (IRCCS) in Building Construction.
- [11] JOUDI, A., SVEDUNG, H., BALES, C., RONNELID, M. - Highly Reflective Coatings for Interior and Exterior Steel Cladding and the Energy Efficiency of Buildings. Applied Energy 2011; 88: 4655 - 4666.
- [12] DAOUD, A., GALANIS, N., BELLACHE, O. - Calculation of Refrigeration Loads by Convection, Radiation and Condensation in Ice Rinks Using Transient 3D Zonal Model. ApplTherm Eng 2008; 28: 1782 – 90.

- [13] KORNADT, O. – Study on the influence of the IR-reflective interior wall paint IReflex on the thermal comfort and the heating energy requirement. Bauhaus Univesity Weimar.
- [14] JOUDI, A., SVEDUNG, H., CEHLIN, M., RONNELID, M. - Reflective Coatings for Interior and Exterior of Buildings and Improving Thermal Performance. Applied Energy 2012; 103:562-70.
- [15] SADINENI, S., MADALA, S., BOEHM, R. - Passive Building Energy Savings: A Review of Building Envelope Components. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011; 15:3617-3631.
- [16] EN ISO 6946: 2007, Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method.
- [17] ISO 7730:2005, Ergonomics of thermal environment – Analytical determination and interpretation o the PMV and PPD using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
- [18] SZOKOLAY, S. V. – Introduction to Architectual Science: The Basis of Sustainable Design. Architectural Press, 2004. ISBN 0 7506 58495.
- [19] American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc. Standard 55: 2004 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
- [20] ASHRAE Handbook of Fundamentals – Human Comfort and Health Requirements.
- [21] FRONTINI, F., KUHN, T. - The Influence of Various Internal Blinds on Thermal Comfort: A New Method for Calculating the Mean Radiant Temperature in Office Spaces. Energy and Buildings 2012; 54:527 – 533.
- [22] LIND, M.A, PETTIT, R.B., MASTERSON, K.D. - The Sensitivity of Solar Transmittance, Reflectance and Absorptance to Selected Averaging Procedures and Solar Irradiance Distributions, Transactions of the ASME, 1980; p. 34-39.
- [23] Cit. por WEN, Y.J., AGOGINO, A.M. - Personalized Dynamic Design of Networked Lighting for Energy-Efficiency in Open-Plan offices. Energy and Buildings 2011; 43: 1919 – 1924.
- [24] OSTERHAUS, W. – Office Lighting: A review of 80 Years o Standards and Recommendations. Toronto: Industry Applications Society Annual Meeting, 1993.
- [25] BELLIA, L., BISEGNA, F., SPADA, G. - Lighting in Indoor Environments: Visual and Non-Visual Effects of Light Sources with Different Spectral Power Distributions. Building and Environment 2011; 46:1984 – 1992.

[26] DUBOIS, M.C., BLOMSTERBERG, A. - Energy Saving Potential and Strategies for Electric Lighting in Future North European, Low Energy Office Buildings: A Literature Review. *Energy and Buildings* 2011; 43:2572 – 2582.

[27] HAGENLOCHER, E. - Colorfulness and Reflectivity in Daylit Spaces. *Óbuda University e-Bulletin*. Vol.3, n.º1 (2012),p.55- 64.

[28] OREL, Z.C., GUNDE, M.K. - Spectrally Selective Paint Coatings: Preparation and Characterization. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2001; 68:337 – 353.

[29] DuPont™ Ti-Pure – Titanium Dioxide for Coatings, U.S.A, 2007.

[30] WIJEWARDABE, S., GOSWAMI, D.Y. - A Review on Surface Control of Thermal Radiation by Paints and Coatings for New energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012; 16:1863 -1873.

[31] EN 12464-1 “Light &Lighting – Lighting of Indoor Workplaces”, 2007.

[32] Guia Prático Philips Iluminação – Lâmpadas, Reactores,Luminárias e LEDs. (Consultado em Dezembro de 2012). Disponível em:

<http://www.carmehil.com.br>

Anexos

Anexo 6.1 – Determinação do factor de utilização

O factor de utilização foi determinado a partir da informação disponibilizada pelos fabricantes para cada tipo de lâmpada ou luminária (Tabela 20 e 21). O valor é obtido cruzando o valor do índice local (K), também designado de factor de área, e o valor de reflexão de luz no tecto, paredes e plano de trabalho.

Tabela 1 - Factor de utilização - Luminária TBS 027 - 2x TLRS 32 W

Fator de Área K	80		70				50		30		0
	50	50	50	50	50	30	30	10	30	10	0
	30	10	30	20	10	10	10	10	10	10	0
0.60	.42	.40	.41	.40	.39	.34	.33	.30	.33	.30	.28
0.80	.50	.47	.49	.48	.46	.41	.40	.37	.40	.37	.35
1.00	.57	.53	.56	.54	.52	.47	.46	.43	.46	.42	.41
1.25	.64	.58	.62	.60	.58	.53	.52	.48	.51	.48	.46
1.50	.69	.62	.67	.64	.62	.57	.56	.53	.55	.52	.51
2.00	.76	.68	.74	.71	.67	.64	.63	.60	.62	.59	.57
2.50	.81	.72	.79	.75	.71	.68	.67	.64	.66	.63	.62
3.00	.85	.74	.82	.78	.73	.71	.70	.67	.68	.67	.65
4.00	.89	.77	.87	.81	.76	.74	.73	.71	.72	.70	.68
5.00	.92	.79	.89	.83	.78	.76	.75	.74	.74	.72	.70

Tabela 2 - Fator de utilização -Lâmpadas incandescentes

K	Teto	70			50			30	
	Parede	50	30	10	50	30	10	30	10
	Plano de trabalho	10			10			10	
0,60		0,31	0,26	0,23	0,30	0,26	0,22	0,26	0,22
0,80		0,36	0,31	0,27	0,35	0,30	0,27	0,30	0,27
1,00		0,43	0,38	0,34	0,42	0,37	0,34	0,37	0,34
1,25		0,48	0,43	0,40	0,47	0,43	0,39	0,42	0,39
1,50		0,52	0,47	0,44	0,50	0,47	0,44	0,46	0,44
2,00		0,57	0,53	0,50	0,56	0,53	0,50	0,53	0,50
2,50		0,61	0,58	0,55	0,60	0,57	0,55	0,57	0,55
3,00		0,63	0,61	0,58	0,63	0,60	0,58	0,60	0,58
4,00		0,67	0,65	0,63	0,66	0,64	0,63	0,64	0,63
5,00		0,69	0,68	0,66	0,69	0,67	0,66	0,67	0,66

Anexo 6.2 - Características das lâmpadas fluorescentes tubulares utilizadas no cálculo luminotécnico

Tabela 3 - Fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas fluorescentes selecionadas.³²

Lâmpadas Fluorescentes Tubulares TLD,TLT e TLE Standard										
Código Comercial	Potência (W)	Base	Temperatura de cor (K)	Fluxo Luminoso (lm)	Eficiência luminosa (lm/W)	Índice de reprodução de cor (IRC)	Vida mediana (horas)	Dimensões em mm		Reator N°
TLD Extra Luz do Dia										
TLD15W-ELD	15	G13	5.000	800	53	70	7.500	28,0	451,6	5, 6
TLD30W-ELD-25	30	G13	5.000	2.000	67	70	7.500	28,0	908,8	–
TLD-18W-54	18	G13	6.200	1.050	58	72	7.500	28,0	604,0	9, 10, 45, 49, 53, 59, 102, 105, 108, 109, 118, 121, 124, 125
TLD-36W-54	36	G13	6.200	2.500	69	72	7.500	28,0	1213,6	13, 14, 47, 51, 55, 61, 103, 106, 119, 122
TLDRS16W-CO-25	16	G13	4.100	1.070	67	66	7.500	28,0	604,0	16, 17, 26, 27, 44, 48, 52, 58, 72, 102, 105, 108, 109, 118, 121, 124, 125
TLDRS32W-CO-25	32	G13	4.100	2.350	73	66	7.500	28,0	1213,6	20, 21, 30, 31, 38, 42, 46, 50, 54, 60, 73
TLT Extra Luz do Dia										
TLTRS20W-ELD-25	20	G13	5.000	1.100	55	70	7.500	33,5	604,0	9, 10, 18, 19, 28, 29, 45, 49, 53, 59
TLTRS40W-ELD-25	40	G13	5.000	2.600	65	70	7.500	33,5	1213,6	13, 14, 22, 23, 32, 33, 47, 51, 55, 61
TLRS-65W-LD	65	G13	6.200	4.100	63	72	7.500	40,5	1514,3	15, 56, 62
TLTRS110W-ELD-NG	110	R17D	5.000	7.600	69	70	7.500	33,5	2385,2	24, 25, 34, 35, 57, 63
TLE Standard										
TLE22W-54	22	G10Q	6.200	1.050	48	72	9.000	28,0	Ø 147,6	–
TLE32W-54	32	G10Q	6.200	1.750	55	72	9.000	28,0	Ø 236,5	–
TLE40W-54	40	G10Q	6.200	2.500	62	72	9.000	28,0	Ø 338,1	–

Anexo 6.3 – Cálculos para determinação das perdas de calor para o exterior

O fluxo de calor que atravessa as paredes do cubo e é perdido para o exterior é dado pela *eq (14)*.

$$\frac{q}{A} = \frac{1}{R_{global}} \times \Delta T \quad eq(14)$$

$$\text{Em que } \Delta T = T_{ar,i} - T_{ar,e} = 316,33 \text{ K} - 287,27 \text{ K} = 29,06 \text{ K}$$

A resistência térmica global à transferência de calor é determinada pela *eq(4)* na qual a resistência térmica à transferência de calor por condução é dada por,

$$R_{cond} = \frac{d}{\lambda_{Térmica}} = \frac{0,015 \text{ m}}{0,25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}} = 0,06 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \quad eq(4)$$

No que diz respeito às resistências térmicas de superfície interior e exterior recorreu-se às seguintes simplificações disponíveis na norma EN ISO 6946:2007,

$$h_{rad} = \varepsilon \cdot h_{r0} \quad eq(15)$$

$$h_{r0} = 4\sigma T_m^3 \quad eq(16)$$

Nas quais, h_{r0} representa o coeficiente de radiação para a superfície de um corpo negro ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}$) e T_m representa temperatura média termodinâmica da superfície e da sua vizinhança (K).

Considerando a emissividade ($\varepsilon = 0,53$) e temperatura da superfície interior pintada com o verniz C/MR + 20% pasta de alumínio e ainda que,

$$T_m = \frac{T_{ar,i} + T_{sméd.refletiva}}{2} = \frac{316,33 + 300,34}{2} = 310,02 \text{ K} \quad eq(17)$$

O coeficiente de radiação da superfície interior é dado por,

$$h_{rad,i} = 0,53 \times 4 \times 5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \times (310,02 \text{ K})^3 = 3,58 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad eq(15)$$

O coeficiente de convecção interior foi definido assumindo fluxo de calor horizontal e por isso tomou o valor de $h_{conv,i} = 2,50 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Assim a resistência térmica de superfície interior é determinada por,

$$R_{s,i} = \frac{1}{h_{rad,i} + h_{conv,i}} = \frac{1}{3,58 + 2,50} = 0,16 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \quad eq(17)$$

A resistência térmica de superfície exterior foi definida de acordo com a Tabela 23, assumindo uma velocidade do vento de 1 m/s.

Tabela 4 – Valores de resistência térmica de superfície exterior para diferentes velocidades do vento (EN ISO 6946:2007)

Wind speed m/s	R_{se} m ² ·K/W
1	0,08
2	0,06
3	0,05
4	0,04
5	0,04
7	0,03
10	0,02

Retomando a *eq (14)*, o fluxo de calor através da parede de alumínio é dado por,

$$\frac{q}{A} = \frac{1}{R_{s,i} + R_{cond} + R_{s,e}} \times \Delta T = \frac{1}{0,16 + 0,06 + 0,08} \times 29,06 = 95,46 \text{ W.m}^{-2} \quad eq(14)$$

Anexo 6.4 - Exemplo de cálculo luminotécnico

O número de lâmpadas necessárias para produzir uma iluminância média de 500 lux (Cenário 1: Escritório) para o caso de referência – superfícies pintadas com a *Tinta B* foi determinado pela eq(12) da seguinte forma,

$$n^{\circ} \text{lâmpadas} = \frac{500 \text{ lux} \times 250 \text{ m}^2}{0,8 \times 0,89 \times 2350 \text{ lm}} = 74 \text{ lâmpadas de } 32 \text{ W} \quad eq(12)$$

Considerando a *Tinta H*, com uma reflexão de luz visível de 96,50%, o rácio entre as iluminâncias produzidas pela *Tinta H* e a tinta de referência, *Tinta B* é dado pela eq(11) e foi determinado da seguinte forma,

$$\frac{E_{TintaH}}{E_{TintaB}} = \frac{(1 - 0,9413)}{(1 - 0,9650)} = 1,68 \quad eq(11)$$

A iluminância que decorre da utilização da *Tinta H* nas superfícies é 1,68 vezes superior à iluminância produzida pela tinta de referência. Consequentemente, o fluxo luminoso que será necessário instalar será menor e o cálculo do número de lâmpadas necessárias é afetado pelo rácio $\frac{E_{TintaH}}{E_{TintaB}}$ da seguinte maneira,

$$\begin{aligned} n^{\circ} \text{lâmpadas} &= \frac{500 \text{ lux} \times 250 \text{ m}^2}{0,8 \times 0,89 \times 2350 \text{ lm} \times \frac{E_{TintaH}}{E_{TintaB}}} = \frac{500 \text{ lux} \times 250 \text{ m}^2}{0,8 \times 0,89 \times 2350 \text{ lm} \times 1,68} \\ &= 44 \text{ lâmpadas de } 32 \text{ W} \quad eq(12) \end{aligned}$$

A poupança que decorre da substituição da tinta de referência e a *Tinta H* foi calculada assumindo um período de funcionamento de 10 *h/dia* e um custo de energia de 0,13 €/KWh.

$$\begin{aligned}
 \text{Poupança} \left(\frac{\text{€}}{\text{ano}} \right) &= (74 - 44) \text{lâmpadas} \times \frac{32 \text{ W} \times 10 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \times 365 \frac{\text{dias}}{\text{ano}} \times 0,13 \text{ €/KWh}}{1000} \\
 &= 455,52 \frac{\text{€}}{\text{ano}} \qquad \qquad \qquad \text{eq(18)}
 \end{aligned}$$